



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**INTENSIFICACIÓ DELS AIGUAMOLLS
CONSTRUÏTS MITJANÇANT PILES
DE COMBUSTIBLE MICROBIANES:
ANÀLISI DEL CICLE DE VIDA**

Treball realitzat per:

Neus Montero Vilar

Dirigit per:

Marianna Garfí

Clara Corbella Vidal

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, **setembre 2016**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

AGRAÏMENTS

Ara que acabo aquesta etapa m'agradaria agrair a totes aquelles persones que, d'alguna forma o altra, hi han posat el seu granet de sorra per a fer-ho possible.

Dedico aquest treball a la meva família, en especial, als meus pares i a la Rut, pel seu suport, la seva paciència i la seva confiança incondicional. Ha sigut un camí llarg i complicat, però gràcies a vosaltres he arribat fins aquí.

També als meus amics, els de sempre i els qui compartirem professió, pels ànims i l'interès mostrat.

A en Martí, pel seu aguant i l'energia transmesa dia rere dia.

A les meves tutores, l'Anna i la Clara, pel seu esforç i la seva dedicació constant i a la resta de professors per haver-me ensenyat, guiat i aconsellat.

RESUM

Els aiguamolls construïts (CW) són sistemes naturals pel tractament d'aigües residuals apropiats per petites comunitats, per zones rurals i per països en vies de desenvolupament. Aquests sistemes presenten els avantatges de necessitar poc manteniment, poca despesa energètica en la seva explotació i una bona integració paisatgística respecte de les estacions de depuració d'aigües residuals convencionals però, per contra, requereixen una superfície específica de tractament molt més gran.

Mitjançant la implementació de piles de combustible microbianes (MFC) en CW s'aconsegueix una millora en l'eficiència de tractament de l'aigua residual que pot traduir-se en una reducció de la superfície de tractament d'aquests. A més, les MFC tenen la capacitat de generar electricitat a partir de la degradació de la matèria orgànica i permeten la reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

L'objectiu principal d'aquest treball és, a partir de la comparació dels impactes ambientals de tres sistemes d'aiguamolls construïts de flux horitzontal (HFCW) ((i) convencional, sense MFC; (ii) amb MFC de grava; (iii) amb MFC de grafit) prèviament dissenyats i dimensionats, identificar el sistema que tingui la menor superfície específica i que sigui competitiu des dels punts de vista ambiental i econòmic amb l'HFCW convencional.

Per avaluar els impactes ambientals produïts per la construcció i l'operació d'aquests sistemes d'HFCW s'aplica la metodologia de l'anàlisi del cicle de vida (ACV). També s'efectua una anàlisi de sensibilitat per comprovar la robustesa dels resultats tot modificant els valors de les variables de la millora de l'eficiència de tractament i de l'electricitat generada per les MFC.

Per avaluar l'impacte econòmic dels sistemes d'HFCW es comparen els pressuposts associats a la seva construcció.

Els resultats obtinguts de l'ACV mostren que per totes les categories d'impacte analitzades els resultats són tan semblants als tres escenaris, excepte pel què fa a la categoria d'*Abiotic depletion* (en aquesta categoria, l'escenari amb MFC de grava genera més impacte que els altres dos principalment a causa de la malla metàl·lica per a la implementació de les MFC), que és difícil d'afirmar que un escenari és millor que els altres. Tanmateix, sí que es pot dir que amb els escenaris amb MFC s'aconsegueix una reducció de la superfície específica respecte de l'escenari sense MFC i aquesta reducció és major si les MFC són de grafit.

A més, en tots els escenaris i en totes les categories d'impacte analitzades (*Abiotic depletion*, *Abiotic depletion (fossil fuels)*, *Global warming*, *Ozone layer depletion*, *Photochemical oxidation*, *Acidification* i *Eutrophication*), les causes principals d'impacte són sempre: l'obra civil (materials i manufacturació), l'operació (consum energètic de la planta en funcionament) i les emissions de gasos d'efecte hivernacle. En tots els escenaris la construcció de l'HFCW és la part que genera més impacte fruit de l'ús dels plàstics (geomembrana) i del material granular (grava), sense oblidar l'ús del grafit als escenaris amb MFC i l'ús de la malla metàl·lica a l'escenari amb MFC de grava.

Cal destacar que l'electricitat generada per les MFC, encara que sigui mínima, contribueix a reduir l'impacte als escenaris on hi són implementades.

L'anàlisi de sensibilitat confirma la robustesa dels resultats obtinguts en l'ACV ja que quan es canvien les variables de la millora de l'eficiència de tractament i de l'electricitat generada per les MFC en els dos escenaris amb MFC, els resultats són similars als escenaris principals (reduccions dels impactes <15%, reduccions no significatives). Només en la categoria d'impacte de l'*Abiotic depletion*, quan es canvia la primera variable esmentada a l'escenari amb MFC de grava l'impacte es redueix significativament (reduccions dels impactes >al 15%).

Els resultats obtinguts de l'anàlisi econòmica mostren que, encara que els sistemes amb MFC permeten una reducció de la superfície específica respecte del sistema sense MFC, els pressuposts dels primers continuen essent més elevats que el del sistema sense MFC. Als HFCW amb MFC l'ús del grafit té un impacte econòmic important i a l'HFCW amb MFC de grava s'hi suma l'impacte de la malla metàl·lica.

Així doncs, si s'aconsegueix millorar l'eficiència de tractament de les MFC es podrà reduir, encara més, la superfície específica dels HFCW respecte dels escenaris principals i, per tant, també respecte de l'escenari sense MFC, mantenint els impactes ambientals. Més encara aquesta millora comportaria una reducció del cost de construcció dels HFCW amb MFC a un nivell que podrien considerar-se competitius respecte del sistema d'HFCW convencional.

En conclusió, s'ha comprovat que els HFCW amb MFC poden substituir els HFCW sense MFC tot permetent la reducció de la superfície específica de tractament i mantenint els impactes ambientals, tot i que amb un major cost de construcció.

Paraules clau: Tractament d'aigües residuals; Sistemes naturals; Aiguamolls construïts; Piles de combustible microbianes; Anàlisi del cicle de vida; Impactes ambientals; Anàlisi econòmica.

ABSTRACT

Constructed wetlands (CWs) are natural systems for wastewater treatment suitable for small communities, rural areas and developing countries. These systems require low maintenance and low energy consumption for their operation and have a proper landscape integration compared with the conventional wastewater treatment plants. However, CWs require a larger specific surface.

Microbial fuel cells (MFCs) implemented in CWs increase the wastewater treatment efficiency and, consequently, is possible to reduce the CWs treatment surface. In addition, MFCs have the capacity to generate electricity from the organic matter degradation and contribute to the reduction of the greenhouse gas emissions.

In this study, three different systems of horizontal flow constructed wetlands (HFCWs) ((i) conventional CW, without MFCs; (ii) CW with gravel MFCs; (iii) CW with graphite MFCs) are designed and assessed from an environmental and economic perspective. The main goal is to identify the CW system with the smallest specific surface which is environmentally and economically competitive with the conventional HFCW.

For the purpose of assessing the environmental impacts generated by the construction and the operation of these systems the life cycle assessment (LCA) methodology is applied. Besides, in order to check the robustness of the results a sensitivity analysis is carried out and the values of the following variables are modified: the improvement of the wastewater treatment efficiency and the electricity generated by the MFCs.

To assess the economic impact of these systems, a comparison between their capital cost is developed.

The LCA results show that, for all the analyzed impact categories, the results of the considered scenarios are similar, except for the *Abiotic Depletion* impact category (in this case, the gravel MFCs scenario generates more impact than the other scenarios mainly due to the metals used for the MFCs implementation). So that, is difficult to say which one is better than the others. Nevertheless, it can be said that the scenarios with MFCs achieve a specific surface reduction when compared to the scenario without MFCs and this reduction is greater for the graphite MFCs scenario.

Moreover, in all the scenarios and in all the analyzed impact categories (*Abiotic depletion*, *Abiotic depletion (fossil fuels)*, *Global warming*, *Ozone layer depletion*, *Photochemical oxidation*, *Acidification* i *Eutrophication*) the construction (materials and manufacturing), the operation (energy consumption) and the greenhouse gases emissions have the most relevant contribution. In all the scenarios the HFCWs construction has the major impact due to the use of plastics (geomembrane) and granular material (gravel), without forgetting the graphite used in the MFCs scenarios and the metal mesh used in the gravel MFCs scenario.

It should be noted that the electricity generated by the MFCs contributes to reduce the environmental impacts in the scenarios where they are implemented.

The sensitivity analysis proves that LCA results are robust for both variables (improvement of the wastewater treatment efficiency and electricity generated by the MFCs). In fact the results are close to the base scenarios (the impacts reductions are less than 15%, non-significant reductions). Only in the *Abiotic depletion* category, when the wastewater treatment efficiency is increased in the gravel MFCs scenario, a significant reduction is obtained (reductions greater than 15%).

The economic analysis results show that, even though the MFCs systems allow the reduction of the specific surface in comparison with the system without MFCs, the capital cost of the first ones are still higher than without MFCs. In the HFCWs with MFCs, the graphite use has a notable economic impact and the gravel MFCs HFCW, in particular, has also the metal mesh economic impact.

It is important to note that it has been checked that if there is an efficiency improvement of the MFCs, the HFCWs specific surface will be reduced in comparison with the base scenarios and, therefore, in comparison with the scenario without MFCs and the environmental impacts will be maintained. Furthermore, this improvement would involve the reduction of the MFCs HFCWs construction costs to a level which could be considered economically competitive in comparison with the conventional HFCW.

In conclusion, it has been verified that the HFCW with MFCs can substitute the HFCW without MFCs because they would reduce the specific surface requirement and, at the same time, they maintain the environmental impacts low, although the construction cost is still higher.

Keywords: Wastewater treatment; Natural systems; Constructed wetlands; Microbial fuel cells; Life cycle assessment; Environmental impacts; Economic analysis.

TAULA DE CONTINGUTS

1.	INTRODUCCIÓ.....	1
2.	OBJECTIUS	3
2.1.	Objectiu principal	3
2.2.	Objectius específics	3
3.	ESTAT DE L'ART	4
3.1.	Els sistemes naturals de tractament d'aigües	4
3.1.1.	Definició.....	4
3.1.2.	Classificació	4
3.2.	Els aiguamolls construïts	4
3.2.1.	Definició.....	4
3.2.2.	Classificació	5
3.2.3.	Avantatges i desavantatges.....	7
3.2.4.	Aiguamolls construïts vs. tractament convencional	7
3.2.5.	Aplicacions.....	8
3.3.	Els aiguamolls construïts de flux horitzontal.....	9
3.3.1.	Elements.....	9
3.4.	Les piles de combustible microbianes.....	10
3.4.1.	Definició.....	10
3.4.2.	Avantatges i desavantatges.....	11
3.4.3.	Aplicacions.....	12
3.5.	Resultat de la sinergia: piles de combustible microbianes aplicades en aiguamolls construïts.....	12
3.5.1.	Paràmetres que afecten la producció d'energia de les piles de combustible microbianes en aiguamolls construïts.....	13
3.6.	Anàlisi del cicle de vida.....	14
3.6.1.	Definició.....	14
3.6.2.	Metodologia	15
3.6.3.	Avantatges i desavantatges.....	17
3.6.4.	Aplicacions.....	18
3.6.5.	Aplicació de l'anàlisi del cicle de vida a sistemes naturals pel tractament d'aigües residuals en comunitats petites.....	18
4.	MATERIALS I MÈTODES	22
4.1.	Disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts a analitzar	22
4.1.1.	Dades de partida	22

4.1.2.	Descripció i dimensionament dels sistemes d'aiguamolls	22
4.2.	Anàlisi del cicle de vida.....	34
4.2.1.	Definició d'objectius i abast	34
4.2.2.	Anàlisi de l'inventari de l'anàlisi del cicle de vida	37
4.2.3.	Avaluació d'impactes	40
4.2.1.	Interpretació.....	41
4.3.	Anàlisi econòmica.....	42
5.	RESULTATS I DISCUSSIÓ	44
5.1.	Resultats de l'anàlisi del cicle de vida	44
5.1.1.	Abiotic depletion	44
5.1.2.	Abiotic depletion (fossil fuels).....	45
5.1.3.	Global warming	46
5.1.4.	Ozone layer depletion	47
5.1.5.	Photochemical oxidation.....	49
5.1.6.	Acidification.....	50
5.1.7.	Eutrophication.....	51
5.1.8.	Resum dels impactes ambientals en els escenaris principals	52
5.1.9.	Anàlisi de sensibilitat.....	53
5.2.	Anàlisi econòmica.....	62
6.	CONCLUSIONS I RECOMANACIONS.....	65
7.	REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES.....	66

ANNEXES

Annex 1. Treballs del disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts

1. Dimensionament dels aiguamolls construïts
2. Amidaments
3. Plànols

Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida

1. Inventari
2. Taules de resultats

Annex 3. Treballs de l'anàlisi econòmica

1. Pressuposts

ÍNDIX DE FIGURES

FIGURA 1. EVOLUCIÓ DEL SANEJAMENT A CATALUNYA.	1
FIGURA 2. ESQUEMA D'UN FWS.	5
FIGURA 3. ESQUEMA D'UN HFCW.	5
FIGURA 4. ESQUEMA D'UN VFCW.	6
FIGURA 5. ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT DEL SISTEMA DE FANGS ACTIVATS.	8
FIGURA 6. ELEMENTS QUE CONSTITUEIXEN L'HFCW.	9
FIGURA 7. EXEMPLES D'ESPÈCIES VEGETALS UTILITZADES EN ELS HFCW.	10
FIGURA 8. ESQUEMA D'UNA MFC DE DUES CAMBRES.	11
FIGURA 9. DIFERENTS CONFIGURACIONS DE MFC EN CW.	12
FIGURA 10. EXEMPLE DE MFC IMPLEMENTADA EN CW.	13
FIGURA 11. ESQUEMA DE L'ACV.	15
FIGURA 12. ETAPES DE LA METODOLOGIA DE L'ACV.	15
FIGURA 13. ABAST DE L'ACV.	16
FIGURA 14. ESQUEMA DELS PASSOS D'AVALUACIÓ D'IMPACTE.	17
FIGURA 15. EXEMPLE DE LA PLANTA GENERAL DEL SISTEMA D'HFCW SENSE MFC.	23
FIGURA 16. SECCIÓ D'UN HFCW SENSE MFC.	32
FIGURA 17. SECCIÓ D'UN HFCW AMB MFC DE GRAVA.	32
FIGURA 18. SECCIÓ D'UN HFCW AMB MFC DE GRAFIT.	32
FIGURA 19. EXEMPLE DE GRAVA.	33
FIGURA 20. EXEMPLE DE MALLA METÀL·LICA.	33
FIGURA 21. EXEMPLE DE GRAFIT.	33
FIGURA 22. ESQUEMA DELS LÍMITS DEL SISTEMA.	36

ÍNDIX DE TAULES

TAULA 1. CLASSIFICACIÓ DELS SISTEMES NATURALS DE TRACTAMENT D'AIGÜES RESIDUALS.	4
TAULA 2. COMPARACIÓ ENTRE ELS HFCW I ELS VFCW.	6
TAULA 3. COMPARACIÓ ENTRE ELS SFCW I ELS SSFCW.	7
TAULA 4. COMPARACIÓ ENTRE ELS CW I ELS FANGS ACTIVATS.	8
TAULA 5. COMPARACIÓ DELS MATERIALS PER A L'ÀNODE.	13
TAULA 6. DADES DE PARTIDA.	22
TAULA 7. DIMENSIONAMENT I MATERIAL DELS ELÈCTRODES.	31
TAULA 8. CONSUM ENERGÈTIC DELS SISTEMES D'HFCW.	38
TAULA 9. EMISSIONS CONSIDERADES REFERIDES A LA FU.	38
TAULA 10. ELECTRICITAT GENERADA PER LES MFC REFERIDA A LA FU.	38
TAULA 11. RESUM DE L'INVENTARI.	40
TAULA 12. ESCENARIS DE L'ANÀLISI DE SENSIBILITAT.	42
TAULA 13. REDUCCIONS DE SUPERFÍCIES DELS ESCENARIS AMB MFC RESPECTE DE L'ESCENARI SENSE MFC. ...	52
TAULA 14. REDUCCIONS DE SUPERFÍCIES DELS ESCENARIS AMB MFC RESPECTE DE L'ESCENARI SENSE MFC SUPOSANT UNA MILLORA DE L'EFICIÈNCIA DE TRACTAMENT DE LES MFC.	61
TAULA 15. COST DE CONSTRUCCIÓ PER HE DELS SISTEMES PRINCIPALS D'HFCW I DEL SISTEMA CONVENCIONAL.	63
TAULA 16. COST DE CONSTRUCCIÓ PER HE DELS SISTEMES PRINCIPALS D'HFCW, DELS SISTEMES D'HFCW DE L'ANÀLISI DE SENSIBILITAT (VARIABLE MILLORA DE L'EFICIÈNCIA DE TRACTAMENT) I DEL SISTEMA CONVENCIONAL.	64

ÍNDEX DE GRÀFIQUES

GRÀFICA 1. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE ABIOTIC DEPLETION (CW SENSE MFC I CW AMB MFC)	44
GRÀFICA 2. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE ABIOTIC DEPLETION (FOSSIL FUELS) (CW SENSE MFC I CW AMB MFC).	45
GRÀFICA 3. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE GLOBAL WARMING (CW SENSE MFC I CW AMB MFC).	46
GRÀFICA 4. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE OZONE LAYER DEPLETION (CW SENSE MFC I CW AMB MFC).	48
GRÀFICA 5. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE PHOTOCHEMICAL OXIDATION (CW SENSE MFC I CW AMB MFC).	49
GRÀFICA 6. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE ACIDIFICATION (CW SENSE MFC I CW AMB MFC).	50
GRÀFICA 7. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE EUTROPHICATION (CW SENSE MFC I CW AMB MFC).	51
GRÀFICA 8. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE ABIOTIC DEPLETION (ANÀLISI DE SENSIBILITAT).	54
GRÀFICA 9. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE ABIOTIC DEPLETION (FOSSIL FUELS) (ANÀLISI DE SENSIBILITAT).	55
GRÀFICA 10. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE GLOBAL WARMING (ANÀLISI DE SENSIBILITAT).	56
GRÀFICA 11. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE OZONE LAYER DEPLETION (ANÀLISI DE SENSIBILITAT).	57
GRÀFICA 12. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE PHOTOCHEMICAL OXIDATION (ANÀLISI DE SENSIBILITAT).	58
GRÀFICA 13. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE ACIDIFICATION (ANÀLISI DE SENSIBILITAT).	59
GRÀFICA 14. RESULTATS DE LA CATEGORIA D'IMPACTE EUTROPHICATION (ANÀLISI DE SENSIBILITAT).	60
GRÀFICA 15. RESULTATS DE L'ANÀLISI ECONÒMICA (SISTEMES PRINCIPALS).	62
GRÀFICA 16. RESULTATS DE L'ANÀLISI ECONÒMICA (ANÀLISI DE SENSIBILITAT, VARIABLE MILLORA DE L'EFICIÈNCIA DE TRACTAMENT DE LES MFC).	64

ABREVIACIONS

ACV	-	Anàlisi del cicle de vida
CW	-	<i>Constructed wetlands</i>
EDAR	-	Estació depuradora d'aigües residuals
FU	-	<i>Functional unit</i>
FWS	-	<i>Free water surface</i>
HE	-	Habitants equivalents
HF	-	<i>Horizontal flow</i>
ISO	-	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	-	<i>Life cycle assessment</i>
MFC	-	<i>Microbial fuel cell</i>
PEC	-	Pressupost d'execució per contracta
PEM ¹	-	<i>Proton exchange membrane</i>
PEM ²	-	Pressupost d'execució material
SF	-	<i>Surface flow</i>
SSF	-	<i>Subsurface flow</i>
TRH	-	Temps de retenció hidràulic
VF	-	<i>Vertical flow</i>
VLT	-	<i>Vegetated land treatment</i>

1. INTRODUCCIÓ

El ràpid creixement de la població mundial comporta, entre d'altres, problemes relacionats amb la qualitat de l'aigua i el seu tractament. L'aigua és un bé escàs que cal preservar ja que és vital per a la supervivència i el desenvolupament dels éssers vius, la conservació dels hàbitats i la qualitat del medi ambient. Amb el sanejament de les aigües residuals es pretén garantir que l'aigua retorni al medi en condicions òptimes.

Encara avui, però, en la majoria de països en vies de desenvolupament, les aigües residuals s'aboquen al mar o als rius sense cap tractament i s'espera que la contaminació de l'aigua continuï augmentant fruit del desenvolupament econòmic.

Per aquest motiu, un dels reptes que es planteja a nivell mundial és el de poder tractar degudament totes les aigües residuals.

Sense anar més lluny, actualment a Catalunya es tracten les aigües residuals generades pel 97% de la població mitjançant les 500 depuradores en servei distribuïdes pel territori que s'adapten a les necessitats de sanejament de cada punt del territori on s'ubiquen en funció de les particularitats urbanes, les orogràfiques, les ambientals i les socioeconòmiques (sistemes convencionals i naturals) (Figura 1).

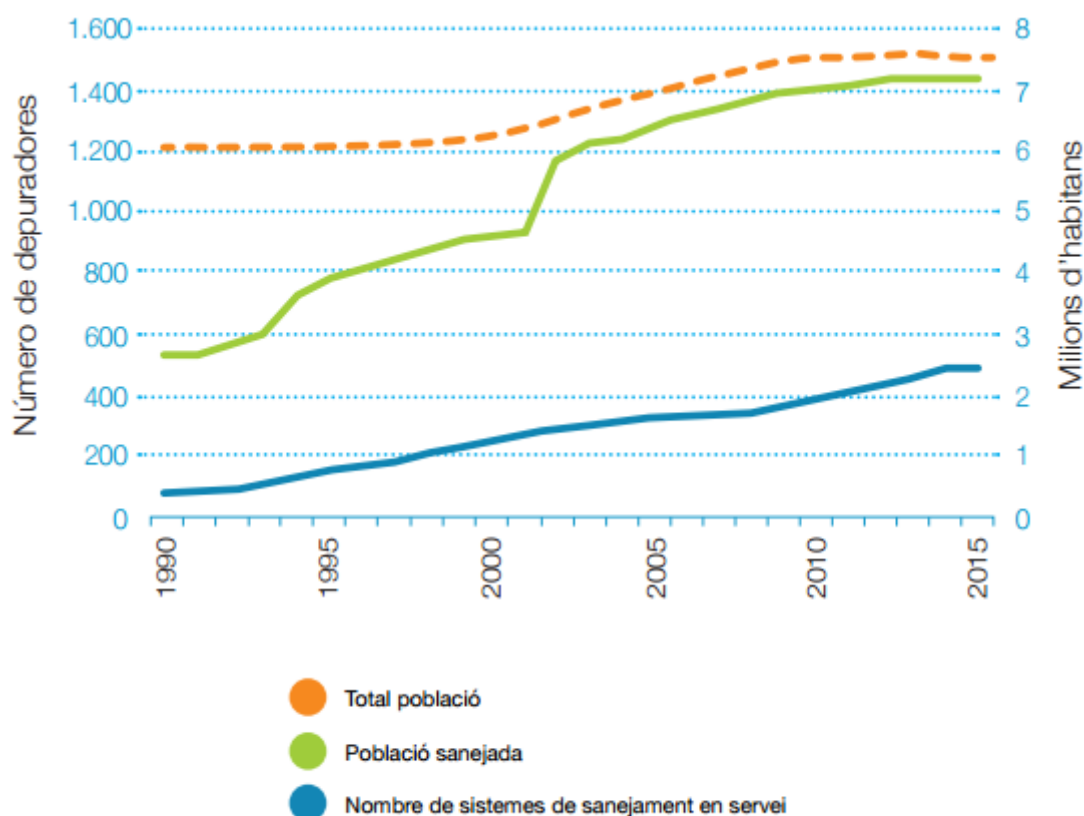


Figura 1. Evolució del sanejament a Catalunya.
(Agència Catalana de l'Aigua, ACA)

Tanmateix, a Catalunya encara queden pendents de sanejament nuclis aïllats i poblacions de menys de 2000 habitants.

Un dels sistemes de sanejament que podria ser viable en nuclis d'aquestes característiques és el dels aiguamolls construïts.

Aquest és un sistema natural consistent en zones entollades de poca profunditat, amb vegetació típica de zones humides, que permeten el tractament de l'aigua residual mitjançant la combinació de diferents processos físics, químics i biològics. Els sistemes d'aiguamolls construïts, a diferència dels sistemes convencionals (fangs activats), requereixen una aportació energètica mínima, necessiten un manteniment senzill i s'integren fàcilment al paisatge. Ara bé, requereixen una superfície específica (m^2/HE) major que aquests sistemes convencionals.

Els sistemes d'aiguamolls construïts són compatibles amb la tecnologia de les piles de combustible microbianes. Aquesta tecnologia es basa en la capacitat de certs bacteris per tractar diferents tipus d'aigües residuals al mateix temps que produeixen energia elèctrica (Pandey et al. 2016). De la sinergia entre aiguamolls construïts i piles de combustible microbianes en resulta la millora en l'eficiència de tractament de l'aigua residual, la generació d'energia elèctrica i la reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

Estudis previs constaten que els aiguamolls construïts són sistemes eficients i que tenen menys impacte ambiental que les plantes convencionals de fangs activats. Ara bé, com ja s'ha esmentat anteriorment, aquests sistemes naturals requereixen una superfície específica elevada i aquesta característica suposa, en molts casos, una limitació per a la seva implementació.

A partir de la comparació dels impactes ambientals de tres sistemes diferents d'aiguamolls construïts (amb i sense piles i amb piles de diferents models) mitjançant la tècnica de l'anàlisi del cicle de vida, l'objectiu principal d'aquest estudi és identificar el sistema d'aiguamolls construïts que tingui la menor superfície específica i que sigui competitiu des del punt de vista ambiental i econòmic amb l'aiguamoll convencional.

2. OBJECTIUS

2.1. Objectiu principal

A partir de la comparació dels impactes ambientals de tres sistemes diferents d'aiguamolls construïts (amb i sense piles i amb piles de diferents models), l'objectiu principal d'aquest treball és identificar el sistema d'aiguamolls construïts que tingui la menor superfície específica i que sigui competitiu des dels punts de vista ambiental i econòmic amb l'aiguamoll convencional.

Per analitzar i avaluar els impactes ambientals produïts per la construcció i l'operació d'aquests sistemes s'utilitza la tècnica de l'anàlisi del cicle de vida.

2.2. Objectius específics

Els objectius específics del treball són:

- Dissenyar tres sistemes d'aiguamolls construïts de flux horitzontal a partir d'unes dades de referència (nombre d'habitants, consum d'aigua i caracterització d'aquesta). Aquests sistemes són:
 - Sistema d'aiguamolls construïts convencional, sense piles de combustible microbianes (*Escenari_sense piles*)
 - Sistema d'aiguamolls construïts amb piles de combustible microbianes de grava (*Escenari_amb piles de grava*)
 - Sistema d'aiguamolls construïts amb piles de combustible microbianes de grafit (*Escenari_amb piles de grafit*)
- Comparar l'impacte ambiental que es produeix per a la construcció i l'operació dels tres sistemes mitjançant la tècnica de l'anàlisi del cicle de vida.
- Comparar entre ells els sistemes d'aiguamolls construïts amb piles de combustible microbianes per determinar quin utilitza un material més sostenible.
- Efectuar una anàlisi de sensibilitat per comprovar la robustesa dels resultats. En particular s'analitzen els paràmetres següents: la millora de l'eficiència de tractament i la generació d'electricitat de les piles de combustible microbianes.
- Estudiar la viabilitat econòmica dels sistemes d'aiguamolls amb piles de combustible microbianes enfront dels sistemes d'aiguamolls convencionals tot elaborant els pressuposts associats a la construcció d'aquests.

3. ESTAT DE L'ART

3.1. Els sistemes naturals de tractament d'aigües

3.1.1. Definició

Els sistemes naturals, també coneguts com sistemes verds, passius, de baix cost o bé tecnologies toves o no convencionals, són sistemes de tractament d'aigües residuals que permeten l'eliminació dels contaminants sense l'aportació d'energia externa ni d'additius químics ja que ho fan aprofitant la interacció de diferents comunitats d'organismes (García, J., & Corzo, A., 2008).

Les diferències principals dels sistemes naturals respecte dels convencionals són:

- Baix o nul consum energètic.
- Major superfície específica.

La implementació d'aquest tipus de tractament ha augmentat gràcies als avantatges que presenta, entre d'altres:

- Un cost d'inversió competitiu.
- Un consum energètic mínim (sistemes de bombament de capçalera) o nul.
- La generació de poca quantitat de fangs.
- La necessitat de poc personal pel manteniment.

Ara bé, cal destacar que el fet que els sistemes naturals requereixin una major superfície específica en comparació amb els convencionals esdevé una desavantatge per aquests sistemes.

3.1.2. Classificació

Els sistemes naturals es poden classificar en dues categories segons si el tractament té lloc bàsicament en el terreny o en una massa d'aigua (Taula 1).

Sistemes naturals de tractament d'aigües residuals				
Basats en l'aplicació de l'aigua en el terreny		Basats en els processos que tenen lloc a la massa d'aigua		
Aplicació subsuperficial	Aplicació superficial	Sistemes amb plantes flotants	Llacunatge natural	Aiguamolls construïts de flux superficial
Rases i lleres filtrants	Filtres verds			
Aiguamolls construïts de flux subsuperficial	Infiltració-percolació			
	Filtres de sorra			

Taula 1. Classificació dels sistemes naturals de tractament d'aigües residuals.
(García, J., & Corzo, A., 2008)

3.2. Els aiguamolls construïts

3.2.1. Definició

Els aiguamolls construïts o artificials, en anglès *constructed wetlands* (CW), són sistemes de depuració constituïts per llacunes o canals poc profunds (normalment menys d'1 m), on s'hi planta vegetació pròpia de zones humides i on els processos de descontaminació es produeixen

mitjançant la interacció entre l'aigua, el substrat sòlid, els microorganismes, la vegetació i, fins i tot, la fauna (García, J., & Corzo, A., 2008).

3.2.2. Classificació

En funció del tipus de circulació de l'aigua, els CW es poden classificar en aiguamolls de flux superficial o aiguamolls de flux subsuperficial.

3.2.2.1. Aiguamolls construïts de flux superficial

En aquests sistemes, en anglès *surface flow* o *free water surface constructed wetlands* (SF o FWS), la làmina d'aigua té una profunditat d'entre 30 i 40 cm, està exposada directament a l'atmosfera i l'aigua circula a través de les fulles i les tiges de les plantes (Figura 2).

L'aplicació principal dels FWS és la de millorar la qualitat dels efluents que ja han sigut tractats prèviament en una depuradora (tractament terciari).

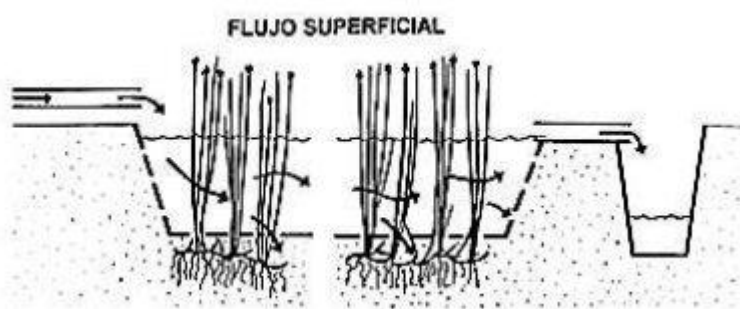


Figura 2. Esquema d'un FWS.
(Imatge de Hans Brix Universitat d'Aarhus - Dinamarca)

3.2.2.2. Aiguamolls construïts de flux subsuperficial

En aquests sistemes, en anglès *subsurface flow constructed wetlands* (SSF), la làmina d'aigua té una profunditat d'entre 30 i 90 cm i la circulació de l'aigua és de tipus subterrani a través del medi granular i en contacte amb les arrels i els rizomes de les plantes.

Els SSF es poden classificar en dues categories en funció del sentit de circulació de l'aigua:

- Aiguamolls horitzontals, en anglès *horizontal flow* (HF) (Figura 3).
- Aiguamolls verticals, en anglès *vertical flow* (VF) (Figura 4).

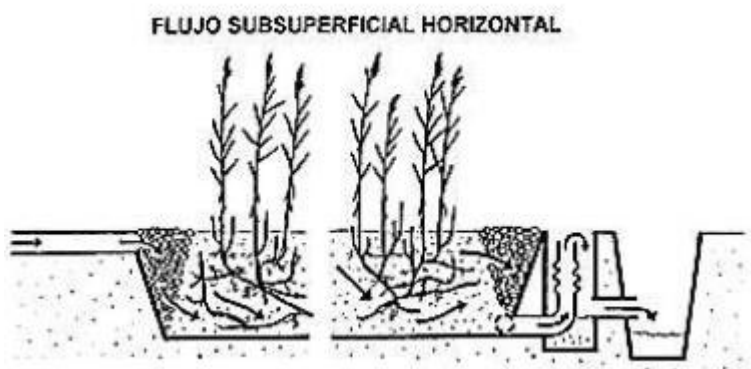


Figura 3. Esquema d'un HFCW.
(Imatge de Hans Brix Universitat d'Aarhus - Dinamarca)

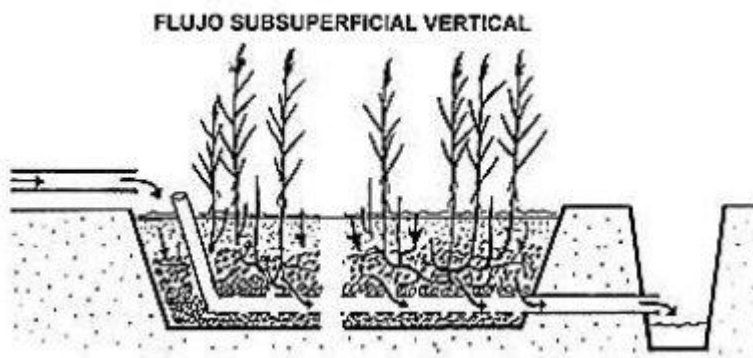


Figura 4. Esquema d'un VFCW.
(Imatge de Hans Brix Universitat d'Aarhus - Dinamarca)

Les diferències entre els HFCW i els VFCW es poden veure a la Taula 2.

	HFCW	VFCW
<i>Funcionament</i>	Continu (permanentment inundat)	Discontinu
<i>Capacitat de tractament (eficiència)</i>	Menor (requereix més superfície específica)	Major (requereix menys superfície específica)
<i>Profunditat de l'aigua</i>	0,3-0,9 m	0,5-0,8 m
<i>Configuració del medi granular</i>	Homogeni	Heterogeni
<i>Estat d'oxidació</i>	Més reduït	Més oxidat
<i>Càrrega orgànica superficial</i>	4-6 g DBO/m ² ·dia	20-40 g DBO/m ² ·dia
<i>Nitrificació</i>	Complicada	Viable (eliminen NH ₃)
<i>Operació</i>	Senzilla	Més complexa

Taula 2. Comparació entre els HFCW i els VFCW.
(Elaboració pròpia)

3.2.2.3. Comparació dels aiguamolls construït de flux superficial i subuperficial

A la Taula 3 es comparen algunes de les característiques dels FWSCW i els SSFCW:

	FWSCW	SSFCW
<i>Tractaments previs</i>	Secundari (són tractaments addicionals per a millorar la qualitat de l'aigua)	Primari
<i>Objectius</i>	Restaurar i depurar	Depurar
<i>Capacitat de tractament (eficiència)</i>	Menor (requereix més superfície per una mateixa càrrega orgànica)	Major (requereix menys superfície per una mateixa càrrega orgànica)
<i>Olors</i>	Es poden controlar	No
<i>Risc sanitari</i>	Major	Menor
<i>Protecció tèrmica</i>	No	Sí (flux subterrani)
<i>Valor ecològic</i>	Major (l'aigua és accessible a la fauna)	Menor (l'aigua no és accessible a la fauna)

	FWSCW	SSFCW
Cost	Menor	Major (a causa de la impermeabilització i del material granular)

Taula 3. Comparació entre els SFCW i els SSFCW.
(Elaboració pròpia)

3.2.3. Avantatges i desavantatges

Els principals avantatges dels CW són (García et al., 2003):

- Generen pocs residus (fangs).
- Comporten un baix cost d'exploració i manteniment:
 - Consum energètic mínim o nul.
 - No necessiten additius químics.
 - No comporten dependència tecnològica ja que l'operació i el manteniment és simple.
 - Requereixen poc personal per a l'operació i el manteniment.
- Tenen un impacte ambiental baix, tan visual com sonor.
- Permeten la creació i/o restauració de zones humides i l'increment de la biodiversitat al mateix temps que s'integren en el paisatge.

Els principals desavantatges dels CW són (García et al., 2003):

- Requereixen major superfície específica que els tractaments convencionals.
- La posada en funcionament no és immediata.
- Difícils de dimensionar perquè alguns dels paràmetres de disseny varien en funció de l'espai físic, el clima, etc.
- Tenen pocs factors de control de la qualitat de l'efluent.
- Tenen el risc de colmar-se i conseqüentment generar males olors, disminuir l'eficiència i incrementar els costos associats a la gestió.
- És possible que generin gasos d'efecte hivernacle.

3.2.4. Aiguamolls construïts vs. tractament convencional

Una vegada coneguts els punts forts i els punts febles dels CW es considera interessant comparar aquests amb els tractaments convencionals, concretament amb el sistema de fangs activats (Figura 5). Aquest últim també és una eina eficaç pel tractament de les aigües residuals i té lloc a les estacions depuradores d'aigües residuals (EDAR); on es tracta una gran quantitat d'aigua utilitzant superfícies específiques relativament petites de forma accelerada, utilitzant additius i amb un consum energètic elevat.

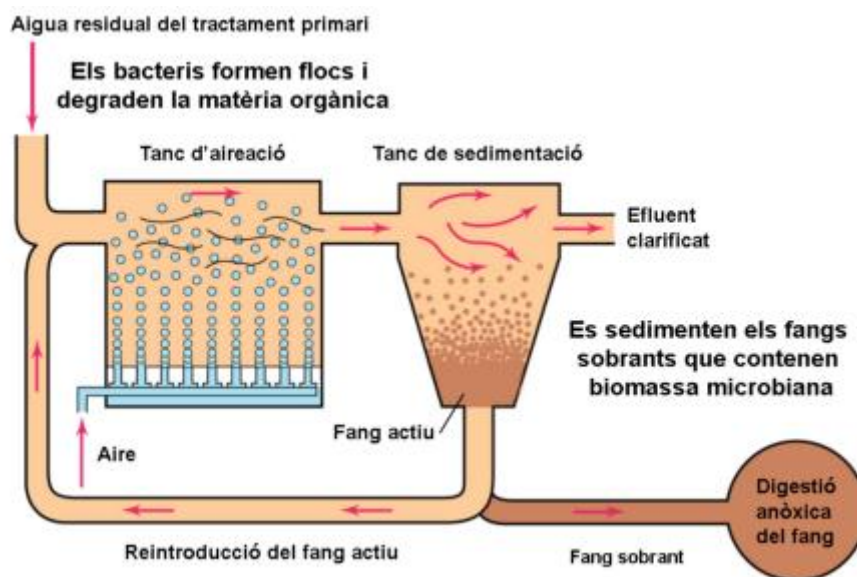


Figura 5. Esquema del funcionament del sistema de fangs activats.
(Vilarrubias, S., 2014)

A la Taula 4 es comparen algunes de les característiques més importants d'ambdós tipus de tractament.

	CW	Fangs activats
<i>Superfície específica</i>	Gran	Petita
<i>Estacionalitat</i>	Tolera cabals irregulars	No tolera cabals irregulars
<i>Cost manteniment</i>	Baix	Alt
<i>Funcionament</i>	No requereix personal tècnic	Requereix personal tècnic
<i>Producció de fangs</i>	Baixa	Alta
<i>Molèstia sorolls</i>	No	Potser
<i>Integració en el medi</i>	Alta	Baixa
<i>Educació ambiental</i>	Molt útil	Útil

Taula 4. Comparació entre els CW i els fangs activats.
(Elaboració pròpia)

3.2.5. Aplicacions

Els CW permeten el tractament de diferents tipus d'aigües residuals (García et al., 2003):

- Aigües domèstiques i urbanes.
- Aigües industrials (en aquests casos la majoria de vegades s'apliquen després d'un tractament convencional).
- Lixiviats d'abocadors (en aquests casos sempre s'apliquen després d'un tractament convencional).
- Aigües de drenatge d'activitats extractives.
- Aigües d'escolament superficial agrícola i urbà.
- Fangs de depuradores.

Cal tenir present que CW són sistemes apropiats per petites comunitats, per zones rurals i per països en vies de desenvolupament.

3.3. Els aiguamolls construïts de flux horitzontal

Ja que l'objectiu d'aquest treball se situa en el context dels HFCW, en aquest apartat s'aprofundeix en aquests sistemes (García, J., & Corzo, A., 2008).

3.3.1. Elements

Els HFCW consten principalment dels elements següents (Figura 6):

- Estructures d'entrada i sortida (canonada de distribució i canonada perforada de recollida).
- Impermeabilització.
- Medi granular.
- Vegetació.

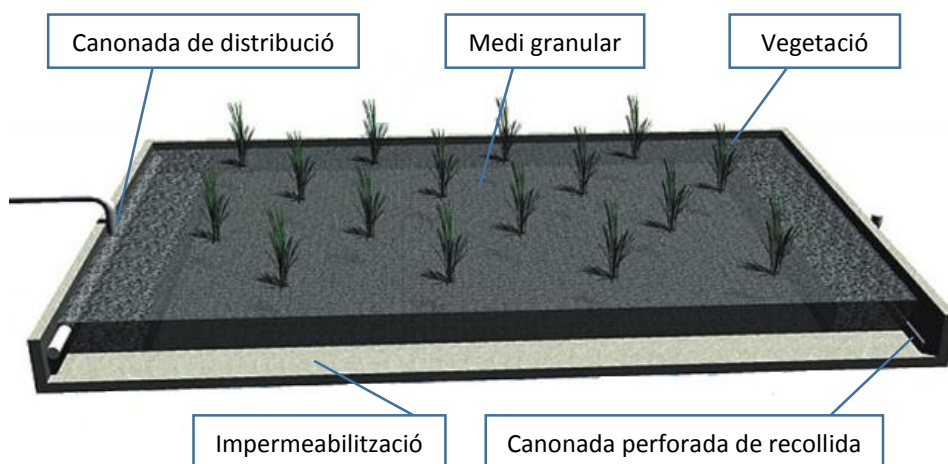


Figura 6. Elements que constitueixen l'HFCW.
(Imatge adaptada de Sedaqua)

3.3.1.1. Les estructures d'entrada i sortida

Un bon disseny i una bona construcció de les estructures d'entrada i sortida permeten assolir una bona qualitat de l'efluent. Per això:

- A l'entrada cal que l'aigua es reparteixi equitativament a través de l'ample de l'HFCW mitjançant una canonada de distribució.
- A la sortida, una canonada perforada connectada a una altra en forma de "L" invertida i d'alçada regulable, recull l'aigua. Aquesta estructura permet regular el nivell d'aigua i drenar l'HFCW durant les operacions de manteniment.

3.3.1.2. La impermeabilització

Es necessari impermeabilitzar el fons i els laterals de l'HFCW per tal de confinar el sistema i evitar la contaminació de les aigües subterrànies. En funció de les condicions hidrogeològiques locals, aquesta impermeabilització s'aconsegueix:

- Compactant adequadament el terreny.
- Aportant argila.
- Utilitzant làmines sintètiques.

3.3.1.3. El medi granular

El medi granular és molt important perquè és on queda retinguda la matèria en suspensió, on hi té lloc la degradació de la matèria orgànica, la transformació i l'assimilació dels nutrients i la inactivació dels microorganismes patògens.

El medi granular, delimitat per les zones d'entrada i sortida, ha de tenir les característiques següents:

- Ha d'estar net (no pot contenir fins).
- Ha de ser homogeni.
- Ha de ser capaç de mantenir la seva forma a llarg termini (dur i durable).
- Ha de permetre el desenvolupament de les plantes i del biofilm.
- El diàmetre recomanable varia entre 5 i 8 mm.
- A l'hora d'escollir-lo s'ha de tenir en compte la conductivitat hidràulica ja que d'aquesta propietat en depèn la quantitat d'aigua que circularà. A més, cal tenir en compte que la conductivitat hidràulica disminueix amb el temps.

3.3.1.4. La vegetació

Les espècies més utilitzades són macròfits emergents típics de les zones humides que poden viure en ambients perfectament entollats (Figura 7):

- El canyís (*Phragmites*)
- La boga (*Typha*)
- El jonc (*Scirpus*)



Figura 7. Exemples d'espècies vegetals utilitzades en els HFCW.
(Afonin et al., 2008)

3.4. Les piles de combustible microbianes

3.4.1. Definició

Les piles de combustible microbianes, en anglès *microbial fuel cells* (MFC), són sistemes basats en la capacitat de certs bacteris per tractar diferents tipus d'aigües residuals al mateix temps que produeixen energia elèctrica (Pandey et al., 2016). En concret, a les MFC els bacteris oxiden la matèria orgànica i la inorgànica i els electrons es transmeten des de l'ànode (pol negatiu) al càtode (pol positiu) a través d'un material conductor (Logan et al., 2006; Rabaey et al., 2007). Per convenció, el corrent circula del pol positiu al negatiu, en sentit contrari al moviment dels electrons.

Existeixen diferents configuracions de MFC. Ara bé, les MFC convencionals estan formades per dues cambres, una anòdica biòtica i una altra catòdica abiòtica, separades per una membrana d'intercanvi de protons, en anglès *proton exchange membrane* (PEM¹) (Figura 8).

El substrat present en la cambra anòdica s'oxida anaeròbiamment produint electrons, protons i diòxid de carboni (CO₂). Els primers es transfereixen a la cambra catòdica mitjançant un circuit extern aprofitant la diferència de potencial elèctric; els segons es transfereixen a la cambra catòdica a través de la PEM¹ per gradient electroquímic. A la cambra catòdica es combinen electrons i protons amb un acceptor d'electrons (com ara l'oxigen) i es propicia la formació d'aigua (H₂O) (Rabaey et al., 2007).

Així doncs, mitjançant l'ús de les MFC l'energia química es converteix en energia elèctrica.

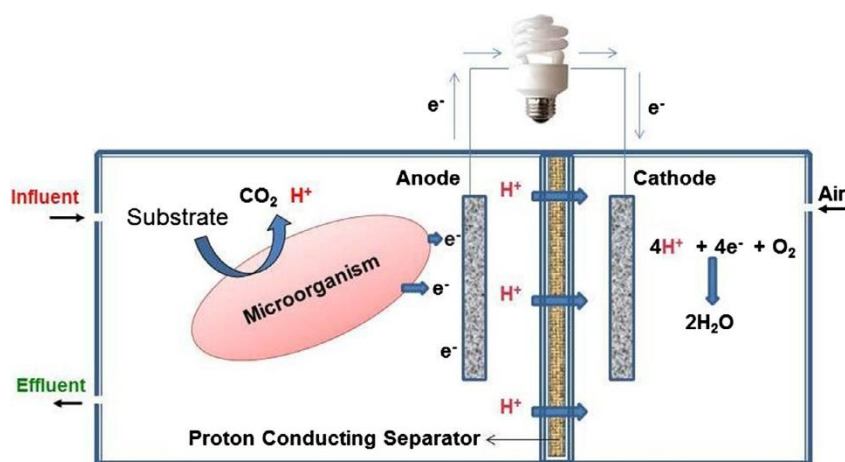


Figura 8. Esquema d'una MFC de dues cambres.
(Pandey et al., 2016)

Un altre tipus de MFC són les *air-cathode MFC* on el càtode està exposat a la superfície i, per tant, no hi ha la necessitat d'airejar-lo ja que aquest s'aireja passivament (Kakarla et al., 2015).

3.4.2. Avantatges i desavantatges

Els principals avantatges de les MFC són:

- La possibilitat d'obtenir energia elèctrica a partir d'un substrat biodegradable (no necessàriament en altes concentracions).
- El valor del corrent generat serveix d'indicador continu de l'eficiència del procés.
- Tenen aplicacions potencials en lloc allunyats en absència d'infraestructura elèctrica.
- No és necessari tractar els gasos produïts ja que principalment els productes generats són diòxid de carboni i nitrogen.
- Són eficients a temperatura ambient i a temperatures baixes.

Els principals desavantatges de les MFC són:

- Actualment encara són poc eficients ja que tenen una baixa producció elèctrica.
- Limitacions, bàsicament de caire econòmic, pel que fa als materials dificulten la implementació de les MFC a gran escala.

3.4.3. Aplicacions

Les possibles aplicacions de les MFC són (Zhang et al., 2013):

- Generació de bioelectricitat.
- Tractament d'aigües residuals.
- Dessalinització.
- Producció química.
- Aplicacions de biosensors.

3.5. Resultat de la sinergia: piles de combustible microbianes aplicades en aiguamolls construïts

Ens els CW es genera de forma natural un gradient redox entre les capes profundes (anaeròbies) i les superficials en contacte amb l'atmosfera que es pot aprofitar per implementar les MFC (Figura 9).

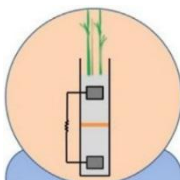
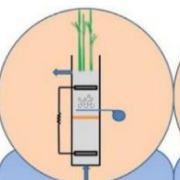
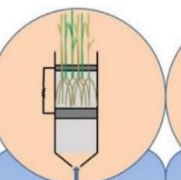
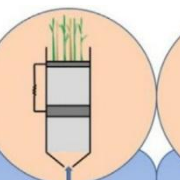
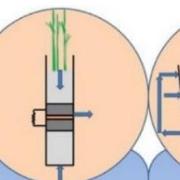
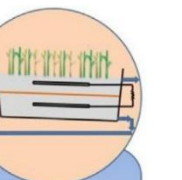
					
Yadav et al., (2012)	Zhao et al., (2013)	Liu et al., (2013)	Fang et al., (2013) ¹ Liu et al., (2014) ² Fang et al., (2015) ³	Doherty et al., (2015)	Villasenor et al., (2013)
Batch Mode	Continuous upflow	Continuous upflow	Continuous upflow	Simultaneous upflow-downflow	Horizontal flow
Graphite plate Glass wool	Graphite plate Glass wool	GAC and SSM	GAC and SSM	Granular graphite Glass wool	Graphite plate
n/a	1.6 Wh/KgCOD	8.5 Wh/KgCOD	¹ 14.0 Wh/KgCOD ² 47.3 Wh/KgCOD ³ 6.5 Wh/KgCOD	3.8 Wh/KgCOD	35.9 Wh/KgCOD

Figura 9. Diferents configuracions de MFC en CW.
(Doherty et al., 2015)

L'aplicació de MFC en CW produeix múltiples efectes (Figura 10):

- Les MFC milloren l'eficiència de tractament de l'aigua residual ja que proporcionen vies de degradació més eficients (exoelectrogèniques). Aquesta millora de l'eficiència es pot traduir en la reducció de la superfície de l'aiguamoll necessària pel tractament de l'aigua o bé en el retorn al medi d'una aigua més neta.
- Les MFC tenen la capacitat de generar electricitat a partir de la matèria orgànica contaminant eliminada de l'aigua residual.
- Les MFC permeten la reducció de l'emissió de gasos d'efecte hivernacle ja que potencien altres vies de degradació de la matèria orgànica.
- Les MFC redueixen la colmatació.



Figura 10. Exemple de MFC implementada en CW.
(Corbella et al., 2015)

3.5.1. Paràmetres que afecten la producció d'energia de les piles de combustible microbianes en aiguamolls construïts

La producció d'energia de les MFC en CW depèn dels paràmetres següents (Corbella, C., & Puigagut, J., 2015):

3.5.1.1. Variables operacionals

- Material dels elèctrodes:

Material de l'ànode

El material de l'ànode ha de tenir les propietats següents (Zhou et al., 2011):

- Bona conductivitat elèctrica i baixa resistència.
- Forta biocompatibilitat.
- Estabilitat química i anticorrosiu.
- Àrea superficial elevada.
- Resistència mecànica i duresa adequades.

Actualment els materials més utilitzats per a l'ànode són els de carboni (Taula 5).

Material de l'ànode	Avantatges	Desavantatges
<i>Barres de grafit</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bona conductivitat elèctrica - Estabilitat química - Relativament barat - Fàcil d'obtenir 	<ul style="list-style-type: none"> - Difícil d'incrementar l'àrea superficial
<i>Raspall de fibres de grafit</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Àrea superficial elevada - Fàcil de produir 	<ul style="list-style-type: none"> - Colmatació
<i>Tela de carboni</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Porositat relativa elevada 	<ul style="list-style-type: none"> - Car
<i>Paper de carboni</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Fàcil de connectar el cablejat 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de durabilitat - Fràgil
<i>Feltre de carboni</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Gran obertura 	<ul style="list-style-type: none"> - Gran resistència
<i>Carboni vítric reticulat (RVC)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bona conductivitat elèctrica - Plasticitat 	<ul style="list-style-type: none"> - Gran resistència - Fràgil

Taula 5. Comparació dels materials per a l'ànode.
(Adaptat de Zhou et al., 2011)

Material del càtode

El material del càtode ha de tenir un potencial redox elevat i ha de permetre capturar protons fàcilment. Actualment els materials més utilitzats són el grafit, la tela de carboni i el paper de carboni (Zhou et al., 2011).

- Configuració dels elèctrodes:

La densitat de potència s'incrementa amb la reducció de la distància entre l'ànode i el càtode (Cheng et al., 2006).

- Configuració dels elèctrodes respecte a la superfície de l'aigua:

Es pot aprofitar el gradient redox natural que hi ha entre la superfície de l'aigua i la base (sediments orgànics en ambients naturals o semi-naturals). Cal que el càtode estigui en contacte directe amb l'aire (Corbella et al., 2015).

- La concentració de càrrega orgànica a la cambra anòdica:

La densitat de potència s'incrementa amb l'augment de la concentració de la matèria orgànica en l'aigua residual (Juang et al., 2011).

- El pH i la temperatura (Jadhav et al., 2009).

3.5.1.2. Factors biològics, químics i elèctrics

- Taxa de conversió de la matèria.
- Sobretensió als elèctrodes.
- Si hi ha membrana, factors relacionats amb aquesta.
- Resistència interna.

3.6. Anàlisi del cicle de vida

A dia d'avui l'interès creixent per a la protecció del medi ambient ha portat a desenvolupar tècniques que ajuden a mesurar i a avaluar l'impacte ambiental associat tant a productes com a processos.

3.6.1. Definició

L'anàlisi del cicle de vida (ACV), en anglès *life cycle assessment* (LCA), és una metodologia que permet identificar, quantificar, interpretar i avaluar els impactes ambientals associats al cicle de vida d'un producte, d'una tecnologia o d'un servei/procés.

Aquesta metodologia es basa en la recollida i l'anàlisi dels inputs i els outputs del sistema (matèries primeres, energia, emissions, residus, etc.) per tal d'obtenir dades quantitatives dels seus impactes ambientals potencials, amb l'objectiu de poder determinar estratègies per a la seva minimització o reducció (Figura 11).

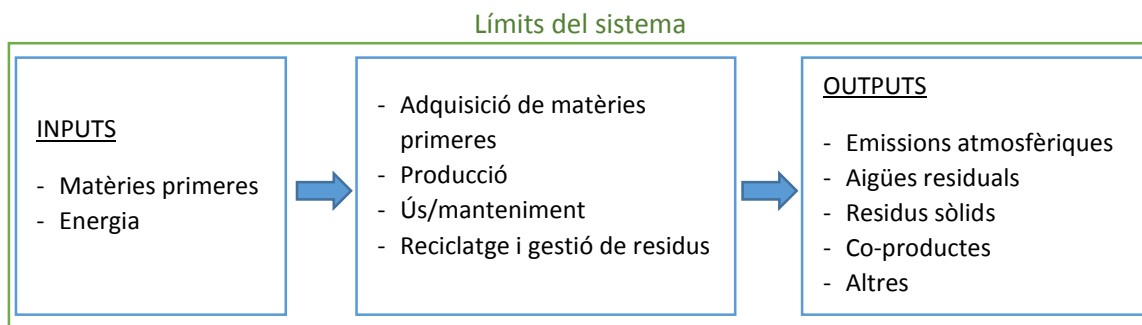


Figura 11. Esquema de l'ACV.
(Fullana i Puig, 1997)

3.6.2. Metodologia

L'aplicació de l'ACV està estandarditzada per la ISO, *International Organization for Standardization*, mitjançant les normes:

- UNE EN ISO 14040:2006. Gestió ambiental. Anàlisi del cicle de vida. Principis i marc de referència.
- UNE EN ISO 14044:2006. Gestió ambiental. Anàlisi de cicle de vida. Requeriments i directrius.

La norma ISO 14044:2006 detalla les etapes necessàries per dur a terme un ACV (Figura 12):

1. Definir l'objectiu i l'abast de l'estudi (unitat funcional i límits del sistema).
2. Recopilar un inventari d'inputs (consum energètics i materials) i outputs (emissions i residus) del sistema.
3. Avaluar l'impacte ambiental associat als inputs i als outputs.
4. Interpretar els resultats obtinguts.

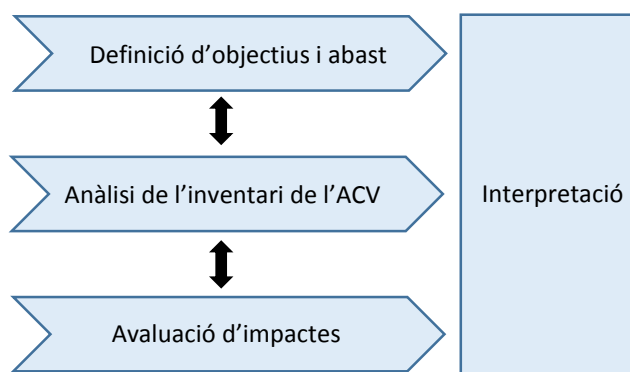


Figura 12. Etapes de la metodologia de l'ACV.
(Norma ISO 14040)

A continuació es detallen aquestes quatre etapes de l'ACV.

3.6.2.1. Definició d'objectius i abast

Cal definir l'objectiu de l'ACV que es vol efectuar, com per exemple:

- Comparar ambientalment dos productes o processos.

- Quantificar impactes ambientals.
- Determinar les etapes del cicle de vida d'un producte o procés que contribueixen més a determinats impactes per tal de poder proposar millores ambientals (reduir energia, matèries primeres i emissions).

L'objectiu d'un ACV pot afectar tan a productes o processos existents com a productes o processos nous.

Unitat funcional

La unitat funcional, en anglès *functional unit* (FU), és la unitat que s'escull per a referir i/o comparar totes les dades del sistema, és a dir, és la unitat a què van referits tots els inputs i els outputs i també tots els impactes. És molt important agafar una FU adequada.

Límits del sistema

Els límits del sistema defineixen què s'inclou i què s'exclou de l'àmbit d'estudi. Normalment s'exclouen aquelles parts del procés que es preveu que no siguin significatives en funció de l'objectiu de l'estudi.

Per definir l'abast d'un ACV s'utilitza la terminologia següent (Figura 13):

- *Gate to gate*, en català de la porta a la porta: l'ACV es limita al procés productiu.
- *Cradle to gate*, en català del bressol a la porta: ACV des de l'obtenció de les matèries primeres a fins el procés productiu inclòs.
- *Cradle to grave*, en català del bressol a la tomba: ACV des de l'obtenció de les matèries primeres fins a la fase de residu del producte inclòs el seu reciclatge i/o gestió final.

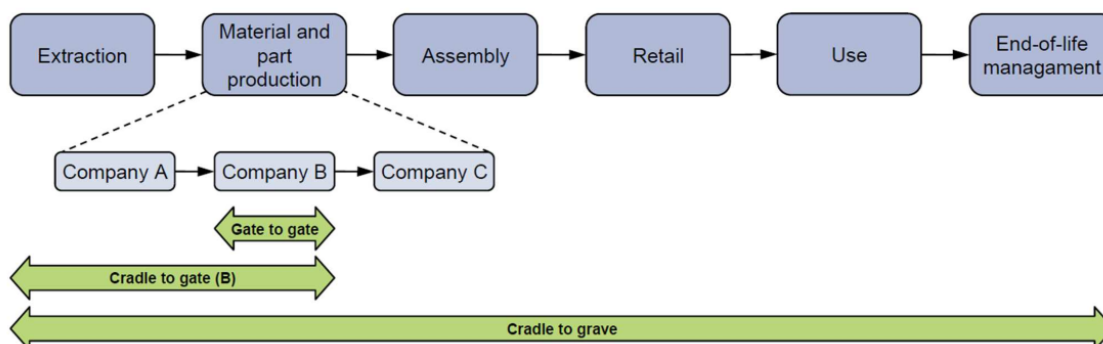


Figura 13. Abast de l'ACV.
(EeBGuide Project)

3.6.2.2. Anàlisi de l'inventari de l'ACV

L'inventari és una recopilació dels inputs i els outputs referits a la FU del sistema estudiat. És l'etapa més exigent i s'han d'evitar errors que després puguin afectar als resultats finals. Aquestes dades poden ser dades genèriques (d'una base de dades) o poden ser dades específiques (obtingudes i calculades pel propi analista).

3.6.2.3. Avaluació d'impactes

En aquesta etapa es calculen els impactes ambientals a partir de les dades de l'inventari, és a dir, les dades recopilades a l'inventari es converteixen en informació interpretable. Aquesta

avaluació es calcula mitjançant un software (ex. SimaPro). El procés es desenvolupa en 5 passos, essent els 2 darrers opcionals (Figura 14):

- I. Selecció i definició de les categories d'impacte: les categories d'impacte es defineixen com les conseqüències que podrien derivar-se dels inputs i outputs d'un sistema per a la salut humana, els ecosistemes o la disponibilitat futura dels recursos naturals.
- II. Classificació: les diferents intervencions ambientals s'agrupen en les categories d'impacte ambiental a què afecten.
- III. Caracterització: s'avalua l'efecte total del sistema del producte sobre cadascuna de les categories d'impacte ambiental utilitzant factors de caracterització.
- IV. Normalització: els resultats de la caracterització es contrasten respecte d'un valor de referència per tal de veure la rellevància de les categories d'impacte entre elles.
- V. Valoració: s'estableix el valor relatiu de cada categoria d'impacte ambiental per tal de poder prioritzar les accions que redueixin aquest impacte.

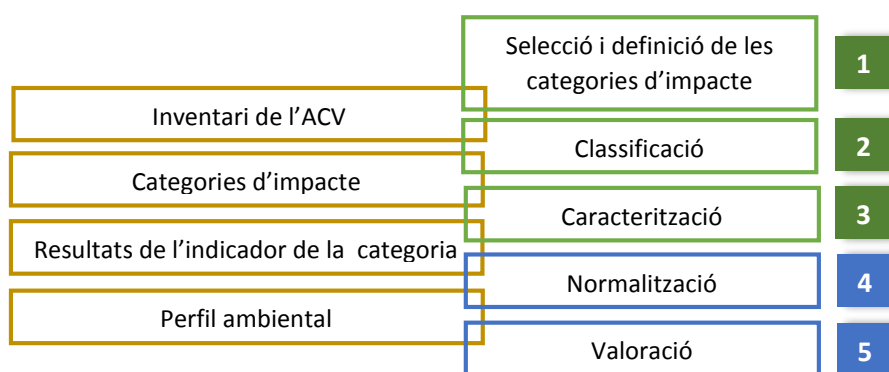


Figura 14. Esquema dels passos d'avaluació d'impacte.
(Elaboració pròpia)

3.6.2.4. Interpretació

En aquesta fase es combina la informació obtinguda a l'inventari i a l'avaluació d'impactes interpretant els resultats d'acord amb els objectius de l'estudi definits a l'inici d'aquest. D'aquesta combinació se'n treuen les conclusions i/o recomanacions.

A més, en aquesta fase s'hi pot incloure una anàlisi de sensibilitat. Aquesta permet avaluar la variació dels impactes potencials degut a canvis en les variables que defineixen el sistema. Per fer-ho, el principi és simple: a partir d'una hipòtesis es canvia el valor d'una variable i es recalcula l'ACV. Amb aquesta anàlisi s'obté una millor comprensió de com els diferents supòsits afecten els resultats.

3.6.3. Avantatges i desavantatges

Els avantatges de l'ACV són:

- Permet l'avaluació d'impactes ambientals d'un producte o procés de manera objectiva i sistemàtica.
- Serveix per definir els aspectes rellevants (*hot spot*) de l'ACV d'un producte i/o procés.
- Permet un coneixement detallat dels impactes ambientals del producte i/o procés.
- És una tècnica que permet la normalització dels resultats.
- És una metodologia estandarditzada (ISO).

El desavantatge principal de l'ACV és que és una tasca cara i complexa (comporta una gran inversió de temps i de coneixements). A més, cal afegir, entre d'altres, les limitacions següents:

- Dificultat per part de l'usuari a l'hora de seleccionar les categories d'impacte, fet que prové d'una manca d'estandardització en gran part de les categories que es troben en l'ACV (Reap et al., 2008).
- Falta de consens internacional en alguns factors de normalització.
- Part de professionals del procés productiu desconeixen la tècnica de l'ACV.

3.6.4. Aplicacions

L'ACV s'aplica a:

- L'ecodisseny per a productes i processos.
- El desenvolupament i la millora de productes i/o processos des d'un punt de vista ambiental.
- La definició de criteris a complir per a les etiquetes ecològiques.
- La implantació de sistemes de gestió ambiental.
- L'estudi comparatiu entre productes anàlegs (mateixa funció però diferent origen i/o composició).
- L'obtenció d'informació sobre el comportament ambiental d'un producte i/o procés.

Actualment, els principals camps d'aplicació són, entre d'altres, els següents:

- Construcció.
- Disseny de productes.
- Gestió de residus.
- Biocombustibles.
- Gestió de l'aigua.

3.6.5. Aplicació de l'anàlisi del cicle de vida a sistemes naturals pel tractament d'aigües residuals en comunitats petites

Cal tenir en compte que en l'àmbit del tractament d'aigües residuals mitjançant sistemes naturals, ja s'han dut a terme diferents ACV, entre d'altres:

❖ Referència: Dixon et al., 2003

Objectiu: avaluar i comparar els impactes ambientals d'un sistema d'HFCW amb canyissars i un filtre biològic airejat (sistema convencional) mitjançant la metodologia de l'ACV.

Consideracions:

- FU: 1 HE
- Vida útil: 10 anys
- Límits del sistema: s'inclouen materials, transport, consum energètic i emissions de les fases de manufacturació, construcció i operació. A més, s'inclou el transport dels fangs a un punt autoritzat però no l'eliminació/tractament final d'aquests.
- Categories d'impacte: consum energètic, emissions de CO₂, emissions sòlides i ocupació del terreny.
- L'estudi inclou una anàlisi de sensibilitat.

Resultats:

- El transport de materials i el transport per a dur a terme el manteniment genera un impacte important en les emissions de CO₂.
- El sistema convencional genera més impacte en tots els aspectes excepte pel què fa a les emissions sòlides (terreny excavat durant la construcció i fangs generats en l'operació).
- Els impactes ambientals generats pel transport dels fangs es poden reduir deshidratant els fangs in situ i reutilitzant-los.
- El bombament del sistema de tractament convencional té un impacte important, superant la construcció, els materials i el transport. Aquest impacte es podria reduir millorant l'eficiència dels bombaments.
- Ambdós sistemes són similars en termes de consum energètic.

❖ **Referència: Machado et al., 2007**

Objectiu: avaluar i comparar els impactes ambientals de 3 sistemes diferents de tractament d'aigua (rasa/llera filtrant, CW i sistema de fangs activats) per petites comunitats mitjançant la metodologia de l'ACV.

Consideracions:

- SimaPro 7.0, mètode CML 2 Baseline 2000
- FU: 100 HE
- Vida útil: 20 anys
- Límits del sistema: s'inclou la producció dels components, la construcció i el muntatge, l'operació i el manteniment, el desmuntatge i l'eliminació final.
- Inventari: materials, combustibles, processos i emissions.
- Els materials més utilitzats són formigó, acer i plàstics.
- Categories d'impacte: esgotament dels recursos abiòtics, escalfament global, reducció de la capa d'ozó, categories de toxicitat, acidificació i eutrofització.

Resultats:

- Els sistemes naturals de tractament d'aigües generen un menor impacte ambiental en comparació amb els convencionals bàsicament perquè requereixen menys recursos: menys materials en les fases de construcció i muntatge i menys consum energètic en les fases d'operació i manteniment. A més, en aquests sistemes naturals l'ús de la biomassa contribueix a reduir l'escalfament global a causa de l'absorció del CO₂.

❖ **Referència: Fuchs et al., 2011**

Objectiu: avaluar i comparar els impactes ambientals d'un sistema de VFCW i un d'HFCW mitjançant la metodologia de l'ACV. A més, també es comparen amb una EDAR (sistema convencional).

Consideracions:

- SimaPro 7.0, mètodes Ecoindicator 99 i CML 2 Baseline 2000
- FU: 400 HE
- Vida útil: 50 anys

- Límits del sistema: s'inclou l'adquisició i la manufacturació dels materials, la construcció i l'operació del tractament primari (fossa sèptica) i del tractament secundari (CW). També inclou les emissions de gasos d'efecte hivernacle, l'abocament de l'aigua però s'exclou la disposició dels fangs.
- No es mostra l'inventari.
- Quantifica els impactes específicament relacionats amb les emissions de nitrogen dels CW.

Resultats:

- En comparació amb els HFCW, els VFCW necessiten menys superfície per dur a terme la desnitrificació i assoleixen estàndards de qualitat de l'aigua generant un menor impacte ambiental. Per tant, els VFCW són més eficients.

❖ **Referència: Yildirim et al., 2012**

Objectiu: avaluar i comparar el comportament ambiental de dos sistemes naturals de tractament d'aigües residuals (*vegetated land treatment*, VLT i CW) amb un sistema de fangs activats (sistema convencional) mitjançant la metodologia de l'ACV.

Consideracions:

- SimaPro 7.1, base de dades EcolInvent V.2, mètode CML baseline 2000
- FU: 1 HE
- Vida útil: 20 anys
- Límits del sistema: s'inclouen les emissions durant la construcció i l'operació. S'exclou el desmuntatge.
- Dades de l'inventari extretes de bases de dades, literatura, càlculs i aplicacions de tractament existents.
- Categories d'impacte: esgotament dels recursos abiòtics, escalfament global, categories de toxicitat, acidificació i eutrofització.

Resultats:

- Per petites comunitats el sistema més adequat és el VLT ja que té el menor impacte en totes les categories d'impacte. A més, en aquests sistemes el potencial de l'escalfament global és negatiu ja que la biomassa que s'hi utilitza és capaç de capturar el CO₂. Ara bé, els VLT no serien aplicables a grans comunitats ja que es necessita una superfície específica molt elevada, ni en espais vulnerables a la contaminació de l'aigua subterrània. En aquests casos es podrien implementar CW. Per últim, el sistema de fangs activats només s'aplicaria en casos excepcionals, quan no es disposés de prou superfície o bé quan l'ambient fos molt sensible als abocaments.

❖ Referència: Flores L., 2015

Objectiu: avaluar els impactes ambientals generats per la construcció i l'operació d'un sistema de CW mitjançant la metodologia de l'ACV i comparar-los amb els de la construcció i l'operació d'una EDAR.

Consideracions:

- SimaPro 8, base de dades EcoInvent3, mètode CML-IA baseline (versió 2015)
- FU: 1 m³ d'aigua tractada
- La vida útil considerada per tots els materials i equipaments és de 20 anys excepte pels sistemes de bombament que és de 10.
- Límits del sistema: s'inclouen les matèries primeres i l'energia de les fases de construcció i operació. També s'inclouen les emissions de gasos d'efecte hivernacle, l'aigua evitada, la cloració i el transport de terres. Es considera que els fangs generats s'incineren.
- Les dades de l'inventari són obtingudes directament a partir del disseny i el dimensionament del sistema de CW o són proporcionades per l'empresa IRIDRA.
- Categories d'impacte analitzades: esgotament dels recursos abiòtics, esgotament dels combustibles fòssils, escalfament global, reducció de la capa d'ozó, acidificació i eutrofització.

Resultats:

- L'operació i l'obra civil (la cloració, el consum energètic, la producció i manufacturació dels plàstics i els metalls i la grava) són les parts que generen més impacte en les categories d'esgotament de recursos, reducció de l'ozó i acidificació.
- En la categoria d'escalfament global tan l'operació com l'obra civil com les emissions tenen un impacte similar.
- El tractament de fangs té una contribució considerable a l'eutrofització.
- L'aigua que es reutilitza contribueix a reduir els impactes de totes les categories.
- Els impactes de l'EDAR són entre 1,5 i 6 vegades superiors als del sistema de CW fet que permet considerar que aquests últims siguin més adequats per petites comunitats.

4. MATERIALS I MÈTODES

4.1. Disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts a analitzar

En aquest apartat es descriu el disseny dels tres sistemes d'HFCW que s'analitzen. Aquests sistemes són:

- Sistema d'HFCW convencional, sense MFC (*Escenari_sense MFC*).
- Sistema d'HFCW amb MFC de grava (*Escenari_amb MFC de grava*).
- Sistema d'HFCW amb MFC de grafit (*Escenari_amb MFC de grafit*).

4.1.1. Dades de partida

Pel disseny del sistema de tractament mitjançant HFCW s'utilitzen com a referència les dades de la Taula 6 extretes del projecte de Cullell, AM. (2015).

Habitants equivalents (HE)	1.500 HE
Dotació per habitant equivalent i dia (Dot)	195 L/HE·dia
Concentració inicial de DBO (C₀)	240 mg DBO/L

Taula 6. Dades de partida.

4.1.2. Descripció i dimensionament dels sistemes d'aiguamolls

Els sistemes d'HFCW es dissenyen per un cabal diari de 292,50 m³/dia produït per una població de 1500 HE i que funcionarà les 24 h del dia durant tot l'any. De forma general, els sistemes estan formats per tres unitats de procés clarament diferenciades:

- 1) El pretractament.
- 2) El tractament primari.
- 3) El tractament secundari.

El pretractament i el tractament primari són tractaments físico-químics per eliminar o reduir les partícules sòlides de l'aigua i retenir la matèria en suspensió continguda en aquesta. Aquests tractaments previs ajuden a evitar el desgast de les canonades i la colmatació dels HFCW.

El tractament secundari és un procés biològic que té com a objectiu eliminar la matèria orgànica dissolta en l'aigua residual.

El sistema dissenyat, en particular, consta, seguint la línia de tractament, de les parts següents (Figura 15):

- L'estació de bombament inicial (pretractament).
- La fossa sèptica (tractament primari).
- Les estacions de bombament dels HFCW.
- Els HFCW (tractament secundari).
- El tanc d'emmagatzematge.
- El sistema de canonades.

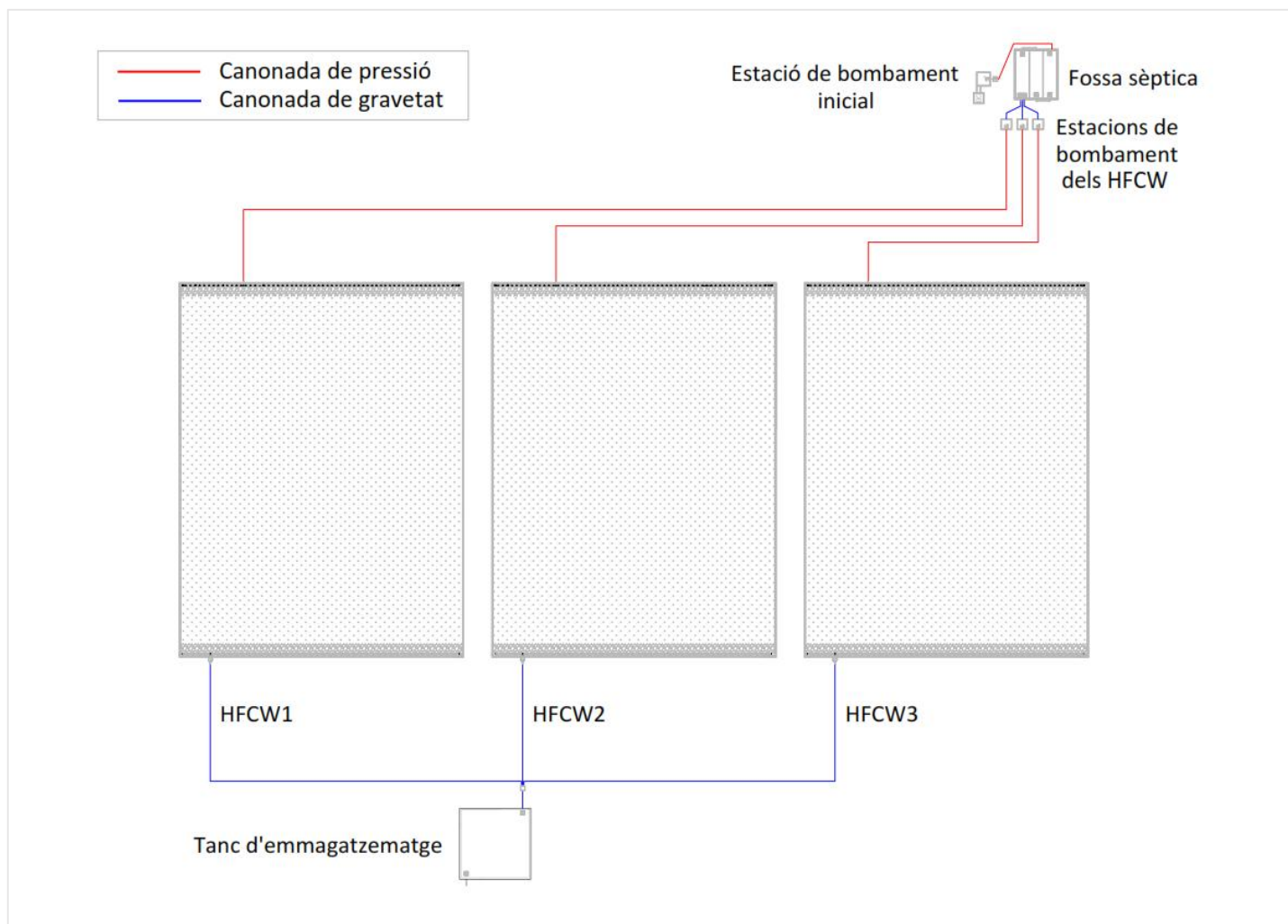


Figura 15. Exemple de la planta general del sistema d'HFCW sense MFC.
(Elaboració pròpia)

Aquestes parts es detallen tot seguit:

4.1.2.1. Estació de bombament inicial

L'aigua provinent de la xarxa de clavegueram es desvia cap al sistema, passa pel pou de registre, el qual és accessible i, havent superat una reixa pel desbast dels sòlids (pretractament), els quals són extrets periòdicament, l'aigua és conduïda fins a la cambra de bombament a través d'un canal de 0,5x0,5 m. El sistema de bombament ha de ser suficient per permetre bombar tota l'aigua que entra el sistema (potència nominal de 1450 W) i disposa d'una vàlvula de comporta i una de retenció. A més, s'instal·la un cabalímetre (potència nominal de 50 W) per mesurar el cabal que transcorre entre l'estació de bombament inicial i la fossa sèptica.

❖ L'estació de bombament inicial descrita coincideix en tots tres sistemes.

4.1.2.2. Fossa sèptica

Com a unitat de tractament primari es disposa d'una fossa sèptica de tres cambres i es calculen les dimensions assumint:

- Un temps de retenció hidràulic (TRH) de 8 h.
- Una producció de fangs de 0,30 L/HE·dia.

Conegut el cabal de disseny (Q) i a partir de la definició de TRH es pot calcular el volum net (V_{net}) necessari per aconseguir la sedimentació dels sòlids:

$$Q = \frac{Dot}{1000} \cdot HE = \frac{195}{1000} \cdot 1500 = 292,50 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$TRH = \frac{V}{Q}; V_{net} = \frac{8}{24} \cdot 292,50 = 97,50 \text{ m}^3$$

Ara bé, tenint en compte que hi ha una producció de fangs i considerant que aquests s'extreuen dues vegades l'any, el volum total de la fossa sèptica és:

$$Volum \text{ anual de fang} = \frac{0,30}{1000} \cdot 1500 \cdot 365 = 164,25 \text{ m}^3$$

$$Volum \text{ total fossa sèptica} = 97,50 + \frac{164,25}{2} = 179,63 \text{ m}^3$$

Les dimensions de la fossa sèptica són:

Llargada	7,70 m
Amplada	6,60 m
Fondària	3,65 m

I, les dimensions de cada cambra són:

Llargada	7,70 m
Amplada	2,13 m
Fondària	3,65 m

A la sortida de la fossa sèptica, unes canonades situades al mateix nivell permeten una distribució equitativa de l'aigua a les diferents estacions de bombament dels HFCW.

❖ La fossa sèptica descrita coincideix en tots tres sistemes.

4.1.2.3. Estacions de bombament dels HFCW

A més a més de l'estació de bombament inicial hi ha situades diferents estacions de bombament per tal de bombar l'aigua cap als HFCW. A cadascuna de les cel·les dels HFCW li correspon una estació de bombament. Aquestes tenen unes dimensions interiors de 1,5 m de llargada, 1,5 m d'amplada i 2,5 m de fondària i cadascuna conté una bomba de potència nominal 750 W i dos sensors de nivell de potència nominal 10 W.

- ❖ Les estacions de bombament dels HFCW descrites coincideix en tots tres sistemes.

4.1.2.4. HFCW

Als HFCW hi té lloc el tractament secundari. El dimensionament dels HFCW es calcula seguint els passos esmentats a García, J., & Corzo, A. (2008). Aquest dimensionament es duu a terme en dues fases:

- [1] Dimensionament biològic: es determina la superfície necessària pel tractament.
- [2] Dimensionament hidràulic: s'estableixen les dimensions geomètriques del sistema.

Dimensionament biològic

L'estimació de la superfície necessària pel tractament es calcula suposant que l'HFCW es comporta com un reactor de flux ideal en pistó, en el qual la degradació de la matèria orgànica té lloc mitjançant una equació cinètica de primer ordre. Per tant, el balanç de massa per un contaminant és:

$$\frac{dC}{dt} = -k_v \cdot C \quad \text{Equació 1}$$

On:

C és la concentració de DBO, en mg /L.

k_v és la constant cinètica de primer ordre, en dies⁻¹.

Integrant l'Equació 1 entre la concentració inicial de contaminant o afluent (C_0 per a $t = 0$) i la final o efluent (C_1 per a $t=t$), substituint el TRH en dies, definint una nova constant cinètica de primer ordre (k_a) en m/dia i aïllant el paràmetre de la superfície (S) s'obté l'equació de disseny recomanada per dimensionar la S de tractament de l'HFCW:

$$S = \frac{Q}{k_a} \cdot \ln \left[\frac{C_0}{C_1} \right] \quad (\text{en m}^2) \quad \text{Equació 2}$$

Consideracions:

- a. El valor de C_0 té en compte la reducció del 30% que es produeix en el tractament primari. Per tant, $C_0 = 168$ mg DBO/L (García, J., & Corzo, A., 2008).
- b. El valor de C_1 ve fixat per la normativa ambiental vigent. Per tant, $C_1 = 25$ mg DBO/L (Danés et al., 2007).
- c. El valor de k_a per eliminar la DBO en els sistemes d'HFCW sense MFC (k_{sp}) és de 0,08 m/d (García, J., & Corzo, A., 2008).
- d. El valor de k_a per eliminar la DBO en els sistemes d'HFCW amb MFC (k_p) s'ha de calcular. Partint de la base que l'objectiu del treball és obtenir un sistema d'HFCW amb la menor superfície específica i sabent que l'ús de MFC en CW millora l'eficiència de tractament (l'aigua surt més neta = reducció de la concentració C_1), es busca una relació entre la k_p

i la k_{sp} fixant C_1 en el valor de la normativa vigent. D'aquesta manera s'obté una reducció de la superfície de tractament.

A partir de l'Equació 2, i aplicant el mètode de reducció es determina la relació entre la k_p i la k_{sp} :

$$k_{sp} = \frac{Q}{S} \cdot \ln \left[\frac{C_o}{C_1} \right]$$

$$k_p = \frac{Q}{S} \cdot \ln \left[\frac{C_o}{(1-x)C_1} \right]$$

$$\frac{k_p}{k_{sp}} = \frac{\ln \left[\frac{C_o}{(1-x)C_1} \right]}{\ln \left[\frac{C_o}{C_1} \right]}$$

On:

x és la millora de l'eficiència de tractament de les MFC (24% per les MFC de grava i 35% per les MFC de grafit) (Corbella, C. & Puigagut, J., under preparation).

Observacions:

Coneguda la S de l'HFCW cal verificar que la càrrega orgànica superficial (C) sigui aproximadament menor a 6 g DBO/m²·dia i en el cas que el valor obtingut fos superior a aquest, s'hauria d'augmentar la S necessària per tal de que es complís aquest criteri.

Ara bé, si es tracta d'un HFCW amb sistemes de tractament intensius (per exemple, en sistemes d'HFCW amb MFC) es podria treballar amb càrregues orgàniques superiors a 6 g DBO/m²·dia .

Dimensionament hidràulic

Una vegada estimada la S de tractament, es calcula el dimensionament hidràulic aplicant la Llei de Darcy, la qual descriu el comportament del flux a través del medi granular i s'expressa:

$$Q = K \cdot A \cdot s \quad \text{Equació 3}$$

On:

Q és el cabal mitjà diari, en m³/dia.

K és la conductivitat hidràulica, en m/dia.

A és la secció de l'HFCW perpendicular al flux, en m².

s és el gradient hidràulic o pendent, adimensional.

A partir de l'Equació 3 es pot determinar l'àrea de la secció transversal (A) i, conegut el seu valor i definida la profunditat de l'aigua (h) en m, es pot conèixer l'amplada (W) i la llargada (L) de l'HFCW:

$$W = \frac{A}{h} \quad (\text{en m}) \quad \text{Equació 5}$$

$$L = \frac{S}{W} \quad (\text{en m}) \quad \text{Equació 4}$$

Consideracions:

- a. $K = 5000 \text{ m/d}$.
- b. S'adopta un factor de seguretat igual a 7 per la K .
- c. $s = 1,00 \%$.
- d. Es considera una h de 0,3 m i una espessor del medi granular de 0,35 m (valors recomanables per potenciar, a més a més, l'eliminació de nitrogen).

Observacions:

Si l'HFCW resultant és més ample que llarg és necessari dividir-lo longitudinalment en cel·les que funcionaran en paral·lel de manera que aquestes siguin, com a mínim, tan llargues com amples (quadrades).

Càlculs i resultats del dimensionament dels HFCW (veure l'Annex 1. Treballs del disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts; apartat 1. Dimensionament dels aiguamolls construïts; sistemes principals)

Sistema d'HFCW convencional (sense MFC)			
DIMENSIONAMENT BIOLÒGIC			
Paràmetres		Valors	Unitats
Concentració inicial de DBO	C_0	168,00	mg/L
Dotació	Dot	195,00	L/HE·dia
Habitants equivalents	Heq	1.500,00	HE
$Q = \text{Dot}/1000 \cdot \text{Heq}$			
Cabal de disseny	Q	292,50	m³/dia
Constant cinètica sense MFC	k_{sp}	0,08	m/dia
Concentració final de DBO	C_1	25,00	mg/L
$S = (Q/k_{sp}) \cdot \ln(C_0/C_1) \cdot f$			
Factor augment superfície	f	1,17	-
Superfície calculada	S	8.126,39	m²
Superfície per habitant equivalent	Seq	5,42	m²/HE
DIMENSIONAMENT HIDRÀULIC			
Paràmetres		Valors	Unitats
Conductivitat hidràulica	K	5.000,00	m³/m²·dia
Gradient hidràulic o pendent	s	1,00	%
$A = Q/(K/fs \cdot s/100)$			
Factor de seguretat	fs	7,00	-
Secció perpendicular al flux	A	40,95	m²
$W = A/h$			
Profunditat de l'aigua	h	0,30	m
Amplada	W	136,50	m
Divisió de cel·les	divcel	3,00	-
Amplada definitiva	Wdef	45,50	m
$L = S/W$			
Llargada	L	59,53	m
ARRODONIMENT			
Paràmetres		Valors	Unitats
Amplada	W	45,50	m
Llargada	L	60,00	m
Número de cel·les	divcel	3,00	-
Superfície HFCW	S	8.190,00	m²
Superfície per habitant equivalent	Seq	5,46	m²/HE
VERIFICACIONS			
1. La càrrega orgànica superficial hauria de ser menor que 6 g DBO/m²·dia			
$C = (Q \cdot C_0)/S$		6,00	g/m²·dia
2. Relació llargada:amplada de la cel·la de l'HFCW	60,00	≥	45,50

Sistema d'HFCW amb MFC de grava			
DIMENSIONAMENT BIOLÒGIC			
Paràmetres		Valors	Unitats
Concentració inicial de DBO	C_0	168,00	mg/L
Dotació	Dot	195,00	L/HE·dia
Habitants equivalents	Heq	1.500,00	HE
$Q = \text{Dot}/1000 \cdot \text{Heq}$			
Cabal de disseny	Q	292,50	m³/dia
Constant cinètica sense MFC	k_{sp}	0,08	m/dia
Millora de l'eficiència de tractament	x	0,24	-
Relació k_p/k_{sp}	rel	1,14	-
Constant cinètica amb MFC	k_p	0,09	m/dia
Concentració final de DBO	C_1	25,00	mg/L
$S = (Q/k_p) \cdot \ln(C_0/C_1) \cdot f$			
Factor augment superfície	f	1,17	-
Superfície calculada	S	7.103,15	m²
Superfície per habitant equivalent	Seq	4,74	m²/HE
DIMENSIONAMENT HIDRÀULIC			
Paràmetres		Valors	Unitats
Conductivitat hidràulica	K	5.000,00	m³/m²·dia
Gradient hidràulic o pendent	s	1,00	%
$A = Q/(K/fs \cdot s/100)$			
Factor de seguretat	fs	7,00	-
Secció perpendicular al flux	A	40,95	m²
$W = A/h$			
Profunditat de l'aigua	h	0,30	m
Amplada	W	136,50	m
Divisió de cel·les	divcel	3,00	-
Amplada definitiva	Wdef	45,50	m
$L = S/W$			
Llargada	L	52,04	m
ARRODONIMENT			
Paràmetres		Valors	Unitats
Amplada	W	45,50	m
Llargada	L	52,50	m
Número de cel·les	divcel	3,00	-
Superfície HFCW	S	7.166,25	m²
Superfície per habitant equivalent	Seq	4,78	m²/HE
VERIFICACIONS			
1. La càrrega orgànica superficial hauria de ser menor que 6 g DBO/m²·dia			
$C = (Q \cdot C_0)/S$		6,86	g/m²·dia
		*sistema intensiu	
2. Relació llargada:amplada de la cel·la de l'HFCW	52,50	≥	45,50

Sistema d'HFCW amb MFC de grafit			
DIMENSIONAMENT BIOLÒGIC			
Paràmetres		Valors	Unitats
Concentració inicial de DBO	C ₀	168,00	mg/L
Dotació	Dot	195,00	L/HE·dia
Habitants equivalents	Heq	1.500,00	HE
$Q = \text{Dot}/1000 \cdot \text{Heq}$			
Cabal de disseny	Q	292,50	m ³ /dia
Constant cinètica sense MFC	k _{sp}	0,08	m/dia
Millora de l'eficiència de tractament	x	0,35	-
Relació k _p /k _{sp}	rel	1,23	-
Constant cinètica amb MFC	k _p	0,10	m/dia
Concentració final de DBO	C ₁	25,00	mg/L
$S = (Q/k_p) \cdot \ln(C_0/C_1) \cdot f$			
Factor augment superfície	f	1,17	-
Superfície calculada	S	6.627,72	m ²
Superfície per habitant equivalent	Seq	4,42	m ² /HE
DIMENSIONAMENT HIDRÀULIC			
Paràmetres		Valors	Unitats
Conductivitat hidràulica	K	5.000,00	m ³ /m ² ·dia
Gradient hidràulic o pendent	s	1,00	%
$A = Q/(K/fs \cdot s/100)$			
Factor de seguretat	fs	7,00	-
Secció perpendicular al flux	A	40,95	m ²
$W = A/h$			
Profunditat de l'aigua	h	0,30	m
Amplada	W	136,50	m
Divisió de cel·les	divcel	3,00	-
Amplada definitiva	Wdef	45,50	m
$L = S/W$			
Llargada	L	48,55	m
ARRODONIMENT			
Paràmetres		Valors	Unitats
Amplada	W	45,50	m
Llargada	L	49,00	m
Número de cel·les	divcel	3,00	-
Superfície HFCW	S	6.688,50	m ²
Superfície per habitant equivalent	Seq	4,46	m ² /HE
VERIFICACIONS			
1. La càrrega orgànica superficial hauria de ser menor que 6 g DBO/m ² ·dia			
$C = (Q \cdot C_0)/S$		7,35	g/m ² ·dia
*sistema intensiu			
2. Relació llargada:amplada de la cel·la de l'HFCW	49,00	≥	45,50

Característiques

Els HFCW tenen les característiques següents:

- Característiques generals dels sistemes d'HFCW (amb MFC i sense MFC):
 - A l'entrada l'aigua es reparteix equitativament a través de l'ample de la cel·la de l'HFCW mitjançant una canonada de distribució.
 - A la sortida l'aigua es recull a través de l'ample de la cel·la de l'HFCW mitjançant una canonada perforada.
 - Les cel·les dels HFCW estan protegides del fons amb geotèxtil i impermeabilitzades amb geomembranes.
 - El material granular té una espessor de 0,35 m a l'entrada i de 0,50 m a la sortida.
 - Es disposa una capa de sorra de 5 cm al llarg de tota la base de la cel·la de l'HFCW.
 - Al llarg dels 2 primers metres i dels 2 últims metres de cada cel·la d'HFCW es constitueix una franja de material granular groller d'elevada conductivitat hidràulica que es manté sense vegetació per evitar possibles colmatacions.
 - Es considera la plantació de *Phragmites australis* amb una densitat de 3 exemplars/m².
 - L'aigua té una profunditat de 0,30 m a l'entrada i de 0,45 m a la sortida (profunditat adequada per potenciar l'eliminació de nitrogen).
 - Cada cel·la té una boca d'accés per accedir a la vàlvula de comporta.
- Característiques particulars dels sistemes d'HFCW amb MFC de grava i de grafit:
 - Càtode:

Tant les MFC de grava com les de grafit tenen el càtode de grafit. El càtode es disposa sobre la superfície de tot l'HFCW en contacte amb l'aire aprofitant el gradient redox natural (excepte les franges de grava grollera) i té un espessor de 12 cm (2 cm per sobre de la làmina d'aigua i 10 cm per sota).
 - Ànode:

Les MFC de grava tenen l'ànode de grava i entremig de la grava s'hi col·loca una malla metàl·lica cada 5 cm. Les MFC de grafit tenen l'ànode de grafit i no cal col·locar-hi la malla metàl·lica ja que el grafit és un material suficientment bon conductor.

A l'ànode és on s'oxida la matèria orgànica i, per tant, s'ubica a l'inici de la cel·la de l'HFCW.
 - La relació càtode-ànode és de 34,36 m²/m³ (Corbella et al., 2015).

A la Taula 7 s'hi mostra el dimensionament i els materials dels elèctrodes per les MFC de cada cel·la de l'HFCW:

		Sistema	
		MFC de grava	MFC de grafit
Ànode (per una cel·la)	Material	grava (+malla metàl·lica)	grafit
	Volum	64,23 m ³	59,59 m ³
	Superfície que ocupa en perfil	1,41 m ²	1,31 m ²
	Superfície que ocupa en planta	298,74 m ²	277,16 m ²
Càtode (per una cel·la)	Material	grafit	
	Volum	264,81 m ³	245,70 m ³
	Espessor	0,12 m	
	Superfície que ocupa en planta	2.206,75 m ²	2.047,50 m ²

Taula 7. Dimensionament i material dels elèctrodes.
(Elaboració pròpia)

A la Figura 16, la Figura 17 i la Figura 18 s'hi poden veure les seccions dels HFCW dels sistemes sense MFC i amb MFC de grava i de grafit, respectivament.

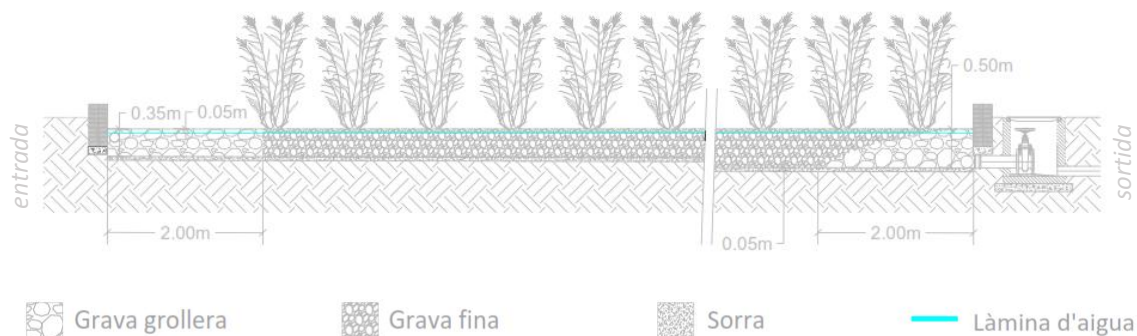


Figura 16. Secció d'un HFCW sense MFC.
(Elaboració pròpia)

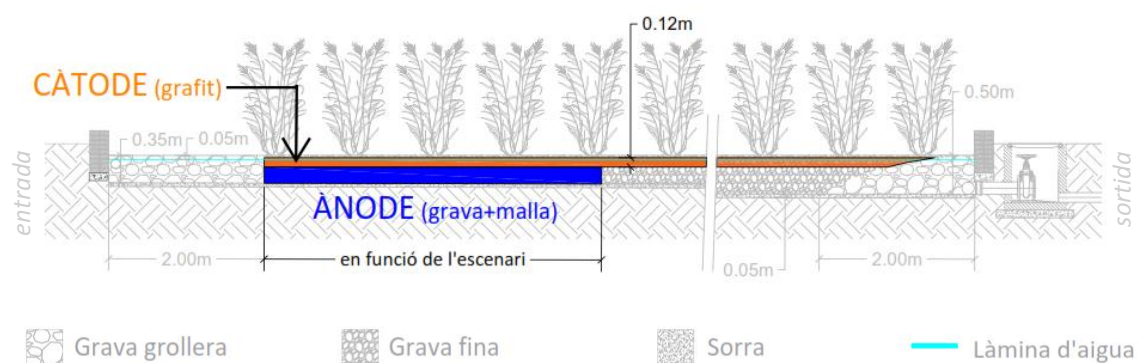


Figura 17. Secció d'un HFCW amb MFC de grava.
(Elaboració pròpia)

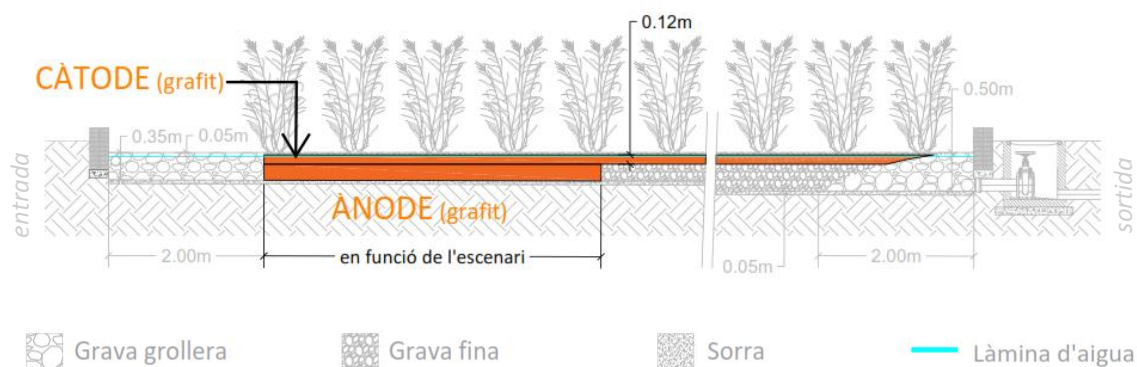


Figura 18. Secció d'un HFCW amb MFC de grafit.
(Elaboració pròpia)

Materials

Algunes de les especificacions dels materials utilitzats en els elèctrodes de les MFC es detallen tot seguit:

Grava

Grava granítica
0,8 cm de diàmetre
 $D_{60} = 7,3$
Coeficient d'uniformitat, $C_u=0,8$
Porositat=40%.



Figura 19. Exemple de grava.
(Torras, C., 2014)

Malla metàl·lica

Acer inoxidable austenític de crom i níquel
5 mm de pas de malla
1 mm de diàmetre

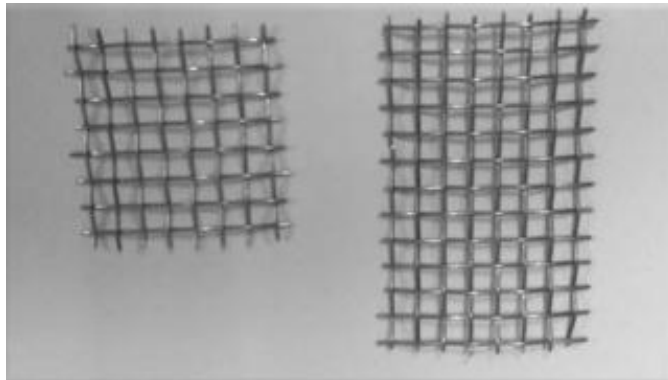


Figura 20. Exemple de malla metàl·lica.
(Torras, C., 2014)

Grafit

Barres de grafit
6,15 mm de diàmetre
102 mm de llargada
Puresa= 99.9995%



Figura 21. Exemple de grafit.
(Torras, C., 2014)

4.1.2.5. Tanc d'emmagatzematge

El tanc d'emmagatzematge es dimensiona perquè sigui suficient per emmagatzemar amb escreix l'aigua tractada al llarg d'un dia més un marge d'un 20%.

$$Volum\ total = 1,20 \cdot Q = 1,20 \cdot 292,50 = 351\ m^3$$

Les dimensions del tanc d'emmagatzematge són:

Llargada	11,00 m
Amplada	11,00 m
Fondària	2,90 m

- ❖ El tanc d'emmagatzematge descrit coincideix en tots tres sistemes.

4.1.2.6. Sistema de canonades

El sistema de canonades està format per canonades de pressió i canonades de gravetat. Els diàmetres nominals d'aquestes canonades s'assumeixen a partir dels càlculs hidràulics efectuats en el treball de Flores, L. (2015).

Les canonades de pressió s'apliquen en els trams de l'estació de bombament inicial a la fossa sèptica i des de les estacions de bombament dels HFCW a les diferents cel·les dels HFCW. Les canonades de gravetat s'apliquen des de la fossa sèptica a les estacions de bombament dels HFCW i des de les boques d'accés dels HFCW al tanc d'emmagatzematge.

Les dimensions de cada tipus de canonada són les següents:

Tipus de canonada	Longitud	Diàmetre nominal
<i>De pressió</i>	319,50 m	110 mm
<i>De gravetat</i>	182,00 m	125 mm

- ❖ El sistema de canonades descrit coincideix en tots tres sistemes.

Per més detall del disseny dels tres sistemes d'HFCW es poden consultar els amidaments i els plànols corresponents (veure l'Annex 1. Treballs del disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts; apartats 2. Amidaments i 3. Plànols; sistemes principals).

4.2. Anàlisi del cicle de vida

En aquest apartat s'aplica l'ACV als sistemes d'HFCW descrits prèviament.

4.2.1. Definició d'objectius i abast

L'objectiu d'aquest ACV és analitzar l'impacte ambiental generat per la construcció i l'operació d'un sistema d'HFCW convencional sense MFC en comparació amb l'impacte ambiental generat per la construcció i l'operació d'un sistema d'HFCW amb MFC o bé de grava o bé de grafit.

4.2.1.1. Unitat funcional

La FU del sistema és: 1 m³ d'aigua tractada.

4.2.1.2. Límits del sistema

En aquest ACV s'inclou:

- L'extracció i la fabricació dels materials de construcció (formigó, metalls, revestiment, plàstics, material granular, elements de maçoneria i grafit).
- El transport del material provinent del moviment de terres, suposant una distància de 50 km.
- L'energia necessària per a l'operació del sistema.
- Les emissions directes de gasos d'efecte hivernacle produïdes als HFCW.
- En els escenaris amb MFC, l'energia generada per aquestes. Segons la ISO, aquesta energia es considera una càrrega evitada ja que contribueix a reduir l'impacte.

En aquest ACV s'exclou:

- El transport dels materials de construcció, al tractar-se d'un transport local (distància < 100 km), no té massa influència.
- El material per l'encofrat es considera que és material llogat i, per tant, la seva vida útil va més enllà de les obres en qüestió.
- La disposició dels fangs generats durant el tractament de l'aigua residual.
- El desmantellament (final de vida) del sistema.
- Les emissions a l'aigua de l'efluent ja que són idèntiques en tots els sistemes i, a més a més, no es disposa d'aquesta informació.

A la Figura 22 s'hi poden veure els límits del sistema.

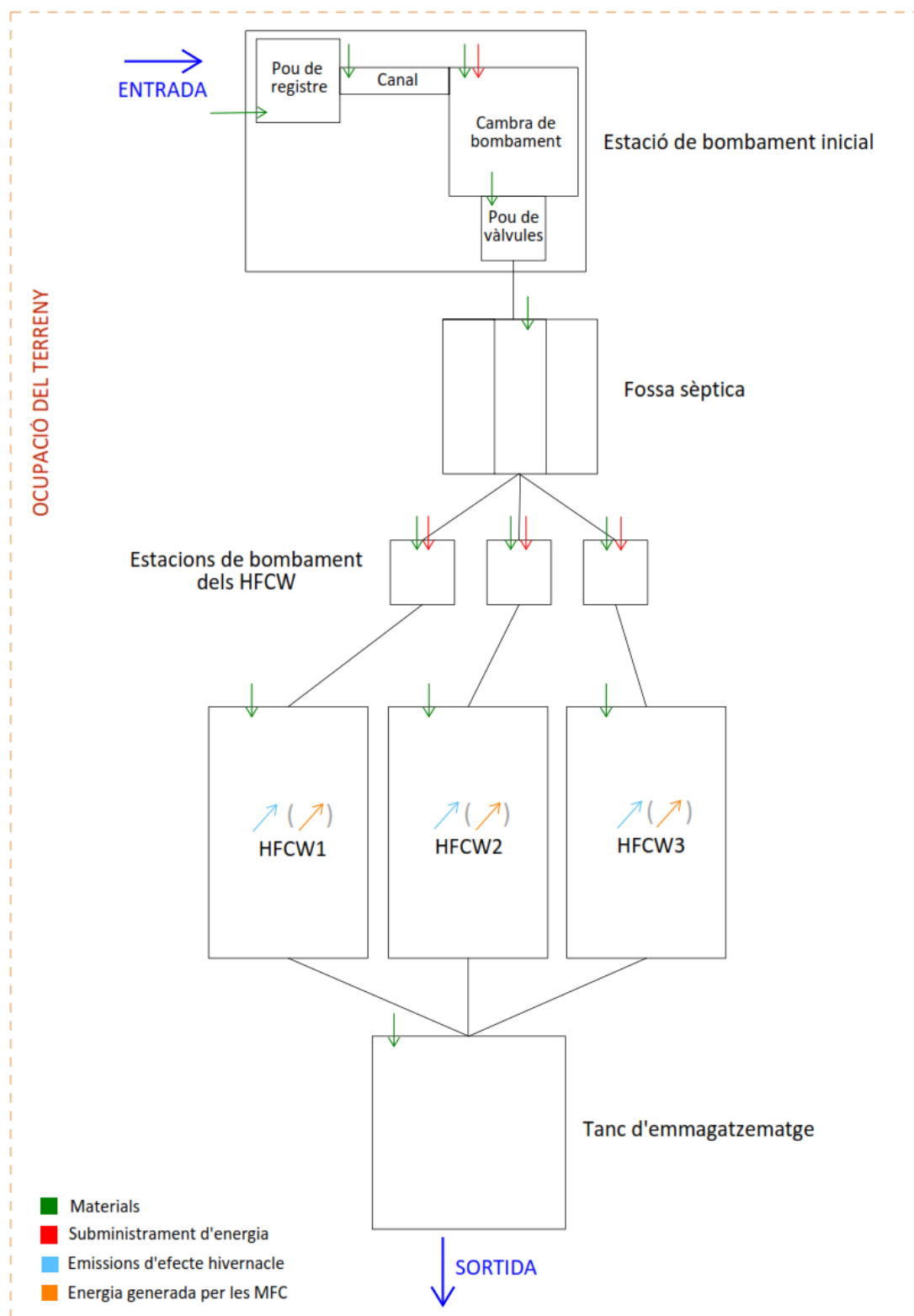


Figura 22. Esquema dels límits del sistema.
(Elaboració pròpia)

4.2.2. Anàlisi de l'inventari de l'anàlisi del cicle de vida

L'anàlisi de l'inventari de l'ACV s'elabora en un full de càlcul i a partir de les dades següents:

- Dades dels amidaments calculats pels tres escenaris principals a partir dels dimensionaments corresponents (veure l'Annex 1. Treballs del disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts; apartat 2. *Amidaments; sistemes principals*)
- Dades obtingudes del treball de Flores, L. (2015).
- Dades de referències bibliogràfiques diverses.

Per tal de facilitar la interpretació, l'inventari es divideix en els apartats d'ocupació del terreny, moviment de terres, obra civil, operació, emissions i electricitat evitada que s'expliquen tot seguit:

Ocupació del terreny

Inclou la definició de la superfície d'actuació.

Moviment de terres

Inclou la preparació del terreny (esbrossada i neteja), els treballs d'excavació i els treballs de terraplenat de l'obra. A més, es té en compte el transport del material sobrant fins a un punt autoritzat.

Obra civil

- Estació de bombament inicial: inclou materials i processos associats a la construcció del pou de registre, el canal, la cambra de bombament i el pou de vàlvules, és a dir, inclou els fonaments, el formigó, les armadures, els revestiments, les tapes i els marcs, els esglaons, la reixa, el sistema de bombament, les connexions de canonades, les vàlvules i el cabalímetre.
- Fossa sèptica: inclou els fonaments, el formigó, les armadures, el revestiment, les tapes i els marcs i les connexions de canonades amb els accessoris corresponents.
- Estacions de bombament dels HFCW: inclou els fonaments, el formigó, les armadures, els revestiments, les tapes i els marcs, els sistemes de bombament, les connexions de canonades i les vàlvules.
- HFCW: inclou els materials i processos associats a la construcció de l'HFCW i la boca d'accés, és a dir, el material granular (grava i sorra), els fonaments, els elements de maçoneria (totxos), les armadures, el formigó, la geomembrana, el geotèxtil, els revestiments, les tapes i els marcs, les canonades d'alimentació i les de drenatge amb els corresponents accessoris i les vàlvules. A més, pels escenaris amb MFC inclou la malla metàl·lica i/o el grafit.
- Tanc d'emmagatzematge: inclou els fonaments, el formigó, les armadures, el revestiment, les tapes i els marcs i les connexions de canonades amb els accessoris corresponents
- Sistema de canonades: inclou els materials i processos associats a les canonades de gravetat i de pressió amb els accessoris corresponents.

Operació

Inclou el consum energètic del sistema generat per la bomba inicial, el cabalímetre, les bombes dels HFCW i els sensors de nivell flotants dels HFCW (Taula 8). Aquest consum es calcula a partir d'informació extreta de Flores, L. (2015) i mitjançant el catàleg de bombes consultat (Bombas Hasa, 2015).

Equipament	Quantitat	Potència nominal (W)	Hores diàries (h/dia)	Energia (Wh)
Bomba inicial	1	1.450	24	34.800
Cabalímetre	1	50	24	1.200
Bomba HFCW	3	750	24	54.000
Sensor de nivell flotant HFCW	6	10	24	1.440
TOTAL				91.440

Taula 8. Consum energètic del sistemes d'HFCW.

L'electricitat necessària referida a la FU és de 0,31 kWh/m³ d'aigua tractada.

Emissions

Inclou els gasos d'efecte hivernacle emesos a l'atmosfera i produïts pels HFCW: metà (CH₄), òxid nitrós (N₂O) i diòxid de carboni (CO₂).

Els valors d'aquestes emissions varien segons si a l'escenari hi ha MFC implementades o no.

Escenaris	Emissions		
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
Sense MFC	10,89 g/m ³ (Corbella, C. & Puigagut, J. 2014)	0,00562 g/m ³ (Mander et al., 2008)	679,30 g/m ³ (Fuchs et al., 2011)
Amb MFC	8,49 g/m ³ (Rizzo et al., 2013)		

Taula 9. Emissions considerades referides a la FU.

Electricitat evitada

Pels escenaris amb MFC inclou l'electricitat generada per aquestes.

Valor	Electricitat evitada
Experimental	0,014 kWh/m ³ d'aigua tractada (Corbella, C. & Puigagut, J., under preparation)

Taula 10. Electricitat generada per les MFC referida a la FU.

Les consideracions pels càlculs de les dades de l'inventari són les següents:

- Se suposa que la planta està en funcionament els 365 dies de l'any i les 24 hores del dia.
- S'utilitza un cabal de disseny de 292,50 m³/dia.
- Es considera una vida útil de 20 anys per tots els materials i equipaments excepte pel sistema de bombament que es considera de 10 anys.

A l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 1. *Inventari; escenaris principals* hi consta l'inventari complet del l'ACV però tot seguit se n'inclou un resum:

UNITATS		ESCENARI		
		sense MFC	amb MFC de grava	amb MFC de grafit
CARACTERÍSTIQUES DEL SISTEMA				
Població equivalent	HE	1.500,00	1.500,00	1.500,00
Superfície específica per HE	m ² /HE	5,46	4,78	4,46
INPUTS				
Materials de construcció				
Estació de bombament inicial				
Formigó	m ³ /m ³	5,77E-06	5,77E-06	5,77E-06
Metalls	kg/m ³	8,51E-04	8,51E-04	8,51E-04
Revestiment	kg/m ³	1,19E-04	1,19E-04	1,19E-04
Plàstics	kg/m ³	4,41E-06	4,41E-06	4,41E-06
Fossa sèptica				
Formigó	m ³ /m ³	3,37E-05	3,37E-05	3,37E-05
Metalls	kg/m ³	3,32E-03	3,32E-03	3,32E-03
Revestiment	kg/m ³	6,23E-04	6,23E-04	6,23E-04
Plàstics	kg/m ³	2,02E-05	2,02E-05	2,02E-05
Estacions de bombament dels HFCW				
Formigó	m ³ /m ³	6,47E-06	6,47E-06	6,47E-06
Metalls	kg/m ³	9,70E-04	9,70E-04	9,70E-04
Revestiment	kg/m ³	1,21E-04	1,21E-04	1,21E-04
Plàstics	kg/m ³	1,32E-05	1,32E-05	1,32E-05
HFCW				
Formigó	m ³ /m ³	1,75E-05	1,63E-05	1,57E-05
Metalls	kg/m ³	8,42E-04	5,32E-03	7,71E-04
Revestiment	kg/m ³	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Plàstics	kg/m ³	7,92E-03	7,01E-03	6,58E-03
Material granular	kg/m ³	2,76E+00	1,83E+00	1,59E+00
Elements de maçoneria	kg/m ³	3,86E-02	3,59E-02	3,46E-02
Grafit	kg/m ³	-	2,99E-01	3,44E-01
Tanc d'emmagatzematge				
Formigó	m ³ /m ³	5,69E-05	5,69E-05	5,69E-05
Metalls	kg/m ³	5,31E-03	5,31E-03	5,31E-03
Revestiment	kg/m ³	5,82E-04	5,82E-04	5,82E-04
Plàstics	kg/m ³	2,39E-06	2,39E-06	2,39E-06
Sistema de canonades				
Plàstics	kg/m ³	1,29E-04	1,29E-04	1,29E-04
TOTAL				
Formigó	m ³ /m ³	1,20E-04	1,19E-04	1,19E-04
Metalls	kg/m ³	1,13E-02	1,58E-02	1,12E-02
Revestiment	kg/m ³	1,46E-03	1,46E-03	1,46E-03
Plàstics	kg/m ³	8,08E-03	7,18E-03	6,75E-03
Material granular	kg/m ³	2,76E+00	1,83E+00	1,59E+00
Elements de maçoneria	kg/m ³	3,86E-02	3,59E-02	3,46E-02
Grafit	kg/m ³	-	2,99E-01	3,44E-01
Operació				
Electricitat	kWh/m ³	3,10E-01	3,10E-01	3,10E-01

UNITATS	ESCENARI		
	sense MFC	amb MFC de grava	Amb MFC de grafit
OUTPUTS			
Emissions			
CH ₄	g/m ³	1,09E+01	8,49E+00
N ₂ O	g/m ³	5,62E-03	5,62E-03
CO ₂	g/m ³	6,79E+02	6,79E+02
Electricitat evitada			
Electricitat generada per les MFC	kWh/m ³	-	1,40E-02

Taula 11. Resum de l'inventari.
(Elaboració pròpia)

4.2.3. Avaluació d'impactes

Per avaluar els impactes ambientals s'utilitza el software SimaPro 8 (PRé Consultants). Aquest software inclou diverses bases de dades i diferents mètodes d'avaluació d'impactes que faciliten l'anàlisi i la representació gràfica dels cicles d'una manera sistemàtica i transparent.

La base de dades que s'utilitza és la Ecoinvent 3. Aquesta conté dades del cicle de vida d'un ampli ventall de sectors: subministrament d'energia, transport, materials de construcció, metalls, productes químics, tractament de residus, etc.

El mètode de d'avaluació que s'utilitza va ser desenvolupat pel Center of Environmental Science (CML) de la universitat de Leiden, a Holanda i és el CML-IA baseline (darrera versió abril de 2015). Aquest mètode es caracteritza per tenir un enfocament midpoint, és a dir, proporciona resultats més fiables i focalitzats en l'impacte però no tan fàcils d'utilitzar per prendre decisions com els resultats d'un enfocament endpoint.

L'avaluació d'impactes es desenvolupa en els passos següents:

4.2.3.1. Selecció de les categories d'impacte

Les categories d'impacte seleccionades en aquest ACV són:

a. Abiotic depletion o esgotament dels recursos abiòtics

Es refereix al consum i a la reducció de recursos no renovables (per exemple, metalls i minerals).

S'expressa en *kg equivalents d'antimoni (Sb)*.

b. Abiotic depletion (fossil fuels) o esgotament dels recursos abiòtics (combustibles fòssils)

Es refereix al consum i a la reducció de combustibles fòssils.

S'expressa en *megajoules (MJ)*.

c. Global warming o escalfament global

Es refereix a l'augment de l'efecte hivernacle causat per l'emissió de gasos contaminants a l'atmosfera, principalment CO₂, CH₄ i N₂O.

S'expressa en *kg equivalents de diòxid de carboni (CO₂)*.

d. Ozone layer depletion o reducció de la capa d'ozó

Es refereix a la reducció de la quantitat d'ozó a l'estratosfera causada per les emissions de clorofluorocarbonis (especialment per escumes, dissolvents, sabons, aires condicionats, etc.).

S'expressa en *kg equivalents de clorofluorocarboni (CFC)*.

e. Photochemical oxidation o oxidació fotoquímica

Es refereix a l'aparició d'oxidants a l'atmosfera originats en reaccionar entre si els òxids de nitrogen, els hidrocarburs i l'oxigen en presència de la llum solar.

S'expressa en *kg equivalents d'etilè (C₂H₄)*.

f. Acidification o acidificació

Es refereix a la pèrdua de la capacitat neutralitzant del sòl i de l'aigua produïda com a conseqüència del retorn a la superfície terrestre dels SO_x, els NO_x i altres contaminants alliberats a l'atmosfera en forma d'àcids (pluja àcida).

S'expressa en *kg equivalents de diòxid de sofre (SO₂)*.

g. Eutrophication o eutrofització

Es refereix a l'enriquiment en nutrients (nitrats i fosfats) d'un ecosistema aquàtic per l'acumulació de matèria orgànica i mineral. Es produeix un increment del creixement de les plantes i un esgotament dels nivells d'oxigen.

S'expressa en *kg equivalents de fosfat (PO₄⁻³)*.

4.2.3.2. Classificació i caracterització

Mitjançant el SimaPro les dades de l'inventari s'assignen a cadascuna de les categories d'impacte escollides i a partir d'uns factors de caracterització aquestes dades es transformen en un únic resultat per a cada categoria d'impacte.

4.2.3.3. Normalització i valoració

Aquests passos són opcionals i no s'apliquen en aquest ACV ja que l'objectiu d'aquest treball no és prioritzar les accions que redueixin l'impacte ambiental de cada categoria sinó identificar el sistema d'HFCW que requereixi una menor superfície específica i que sigui competitiu ambientalment amb l'HFCW convencional.

4.2.1. Interpretació

En aquesta etapa s'interpreten els resultats de l'ACV d'acord amb l'objectiu de l'estudi prèviament definit (veure Apartat 5.1).

A la vista dels resultats s'efectua una anàlisi de sensibilitat per tal de comprovar la robustesa dels resultats de l'ACV. Aquest ACV es recalcula modificant els paràmetres següents:

- Millora de l'eficiència de tractament de les MFC.
- Electricitat mitja que generen les MFC.

A la Taula 12 es mostren els escenaris resultants d'aquesta anàlisi de sensibilitat.

Escenari principal	Escenari anàlisi de sensibilitat	Paràmetre modificat	Valor	Referència bibliogràfica
_amb MFC de grava	_1 amb MFC de grava	Millora de l'eficiència de tractament de les MFC	75%	supòsit
_amb MFC de grafit	_1 amb MFC de grafit			
_amb MFC de grava	_2 amb MFC de grava		85%	supòsit
_amb MFC de grafit	_2 amb MFC de grafit			
_amb MFC de grava	_amb MFC de grava_mig	Electricitat mitja generada per les MFC	0,04 kWh/m ³ d'aigua tractada	Ge et al., 2013
_amb MFC de grafit	_amb MFC de grafit_mig			
_amb MFC de grava	_amb MFC de grava_màx		0,07 kWh/m ³ d'aigua tractada	Logan, B. E. & Rabaey, K., 2012
_amb MFC de grafit	_amb MFC de grafit_màx			

Taula 12. Escenaris de l'anàlisi de sensibilitat.
(Elaboració pròpia)

Per dur a terme aquesta anàlisi de sensibilitat és necessari efectuar de nou els treballs següents quan es modifica el paràmetre de la millora de l'eficiència de les MFC:

- Un dimensionament dels escenaris d'HFCW resultants (veure l'Annex 1. Treballs del disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts; apartat 1. *Dimensionament dels aiguamolls construïts; anàlisi de sensibilitat*).
- Uns amidaments dels escenaris d'HFCW resultants (veure l'Annex 1. Treballs del disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts; apartat 2. *Amidaments; anàlisi de sensibilitat*).
- Uns plànols dels escenaris d'HFCW resultants (veure l'Annex 1. Treballs del disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts; apartat 3. *Plànols; anàlisi de sensibilitat*).

A partir d'aquestes dades s'elabora l'anàlisi de l'inventari en un full de càlcul i es recalcula l'ACV.

Quan es modifica el paràmetre de l'electricitat mitja generada per les MFC no cal un nou dimensionament ni nous amidament sinó que els valors que es canvien s'introdueixen directament a l'inventari i es recalcula l'ACV.

Els resultats de l'anàlisi de sensibilitat s'interpreten a l'Apartat 5.1.9. Aquesta interpretació es fa tenint en compte que, si els resultats de l'anàlisi de sensibilitat varien menys d'un 15% respecte dels de l'ACV, aquests no es consideren com a significatius.

4.3. Anàlisi econòmica

Per a l'anàlisi econòmica s'elaboren els pressuposts dels tres sistemes d'HFCW principals i es comparen entre ells. Aquests pressuposts inclouen els costos de construcció i exclouen els de manteniment i de gestió.

Els pressuposts dels tres sistemes d'HFCW s'elaboren mitjançant el programa TCQ2000 i amb les dades procedents de:

- Els amidaments (veure l'Annex 1. Treballs del disseny dels sistemes d'aiguamolls construïts; apartat 2. *Amidaments; sistemes principals*).
- La base de dades del banc Bedec (àmbit de preus de Barcelona a gener de 2016).

Únicament els preus de la malla metàl·lica i el grafit són proporcionats directament per empreses del sector.

Es calculen els pressuposts d'execució material (PEM²) i també els pressupost d'execució per contracta (PEC). Aquests darrers inclouen un 13% de despeses generals, un 6% de benefici industrial i un 21% d'IVA (veure l'Annex 3. *Treballs de l'anàlisi econòmica; apartat 1. Pressuposts; sistemes principals*).

A més, els costos de construcció dels sistemes de CW estudiats es comparen amb el cost de construcció d'un sistema de tractament convencional, obtingut de Cullell, A.M. (2015).

A part, com que s'ha fet una anàlisi de sensibilitat que ha requerit un nou dimensionament i uns nous amidaments, a partir d'aquests s'han elaborat uns nous pressuposts tan PEM² com PEC que tenen en compte els nous escenaris resultants amb els canvis del paràmetre de millora de l'eficiència de les MFC (veure l'Annex 3. *Treballs de l'anàlisi econòmica; apartat 1. Pressuposts; anàlisi de sensibilitat*).

Els resultats de l'anàlisi econòmica s'interpreten a l'Apartat 5.2.

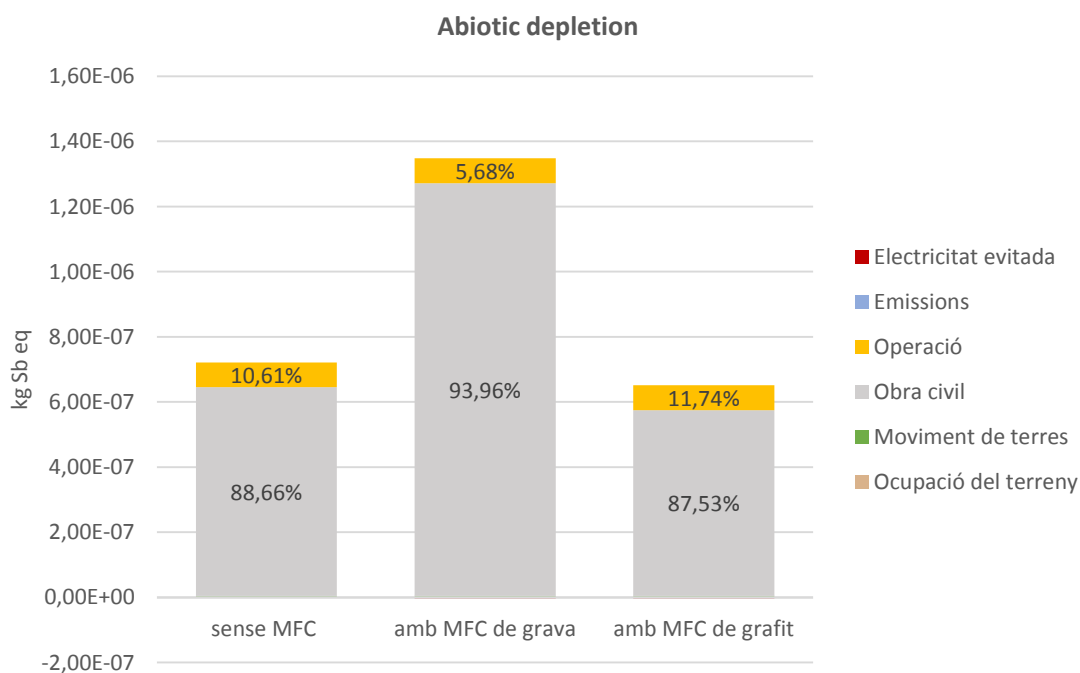
5. RESULTATS I DISCUSSIÓ

5.1. Resultats de l'anàlisi del cicle de vida

En aquest apartat es comenten els resultats obtinguts per cada categoria d'impacte pel què fa als escenaris sense MFC, amb MFC de grava i amb MFC de grafit. Per més detall d'aquesta anàlisi, es pot consultar l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals.*

5.1.1. Abiotic depletion

	Escenari					
	sense MFC		amb MFC de grava		amb MFC de grafit	
Impact category	Abiotic depletion					
Unit	kg Sb eq					
Total	7,22E-07		1,35E-06		6,48E-07	
Ocupació del terreny	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Moviment de terres	5,29E-09	0,73%	4,92E-09	0,36%	4,74E-09	0,73%
Obra civil (materials i manufacturació)	6,40E-07	88,66%	1,27E-06	93,96%	5,71E-07	87,53%
Operació	7,66E-08	10,61%	7,66E-08	5,68%	7,66E-08	11,74%
Emissions	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Electricitat evitada	0,00E+00		-3,46E-09		-3,46E-09	



Gràfica 1. Resultats de la categoria d'impacte Abiotic Depletion (CW sense MFC i CW amb MFC).
(Elaboració pròpia)

L'escenari amb MFC de grava té el major impacte total (gairebé el doble dels altres escenaris) a conseqüència de l'impacte que té l'obra civil en aquest escenari (93,96% respecte del total d'aquest escenari). Tenint en compte únicament l'obra civil és la construcció de l'HFCW la que té més impacte i dins la construcció de l'HFCW els metalls, concretament la malla metàl·lica, són

els elements que causen més impacte (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

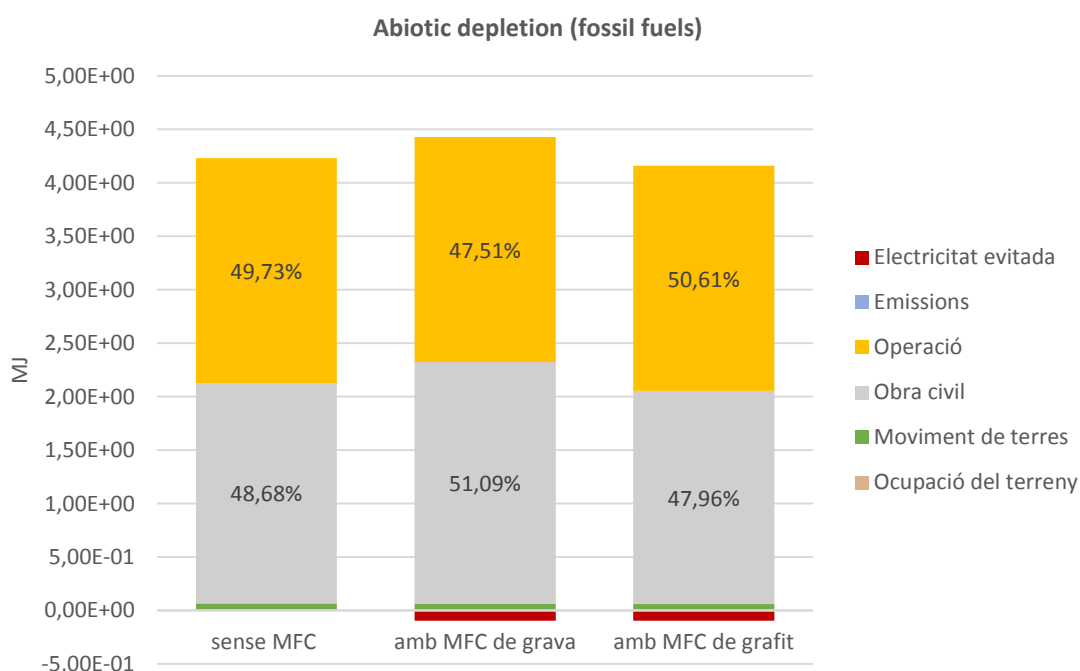
En els altres dos escenaris el major impacte també és fruit de l'obra civil i de la construcció de l'HFCW. Tanmateix, en aquests casos el major impacte no el causen els metalls sinó el material granular (grava) (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

L'operació (consum energètic del funcionament del sistema) és la segona causa més important d'aquesta categoria d'impacte representant respecte del total de l'impacte un 10,61%, un 5,68% i un 11,74% en l'escenari sense MFC, l'escenari amb MFC de grava i l'escenari amb MFC de grafit respectivament.

L'electricitat produïda per les MFC contribueix a reduir l'impacte global dels escenaris on hi són implementades (0,26% i 0,53% en l'escenari amb MFC de grava i en l'escenari amb MFC de grafit respectivament).

5.1.2. Abiotic depletion (fossil fuels)

	Escenari					
	sense MFC		amb MFC de grava		amb MFC de grafit	
Impact category	Abiotic depletion (fossil fuels)					
Unit	MJ					
Total	4,23E+00		4,33E+00		4,06E+00	
Ocupació del terreny	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Moviment de terres	6,76E-02	1,60%	6,21E-02	1,40%	5,95E-02	1,43%
Obra civil (materials i manufacturació)	2,06E+00	48,68%	2,26E+00	51,09%	1,99E+00	47,96%
Operació	2,10E+00	49,73%	2,10E+00	47,51%	2,10E+00	50,61%
Emissions	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Electricitat evitada	0,00E+00		-9,50E-02		-9,50E-02	



Gràfica 2. Resultats de la categoria d'impacte Abiotic Depletion (fossil fuels) (CW sense MFC i CW amb MFC).
(Elaboració pròpia)

L'escenari amb MFC de grava té el major impacte total, si bé sense massa diferència respecte dels altres dos escenaris (1,02 vegades l'impacte de l'escenari sense MFC i 1,07 vegades l'impacte de l'escenari amb MFC de grafit).

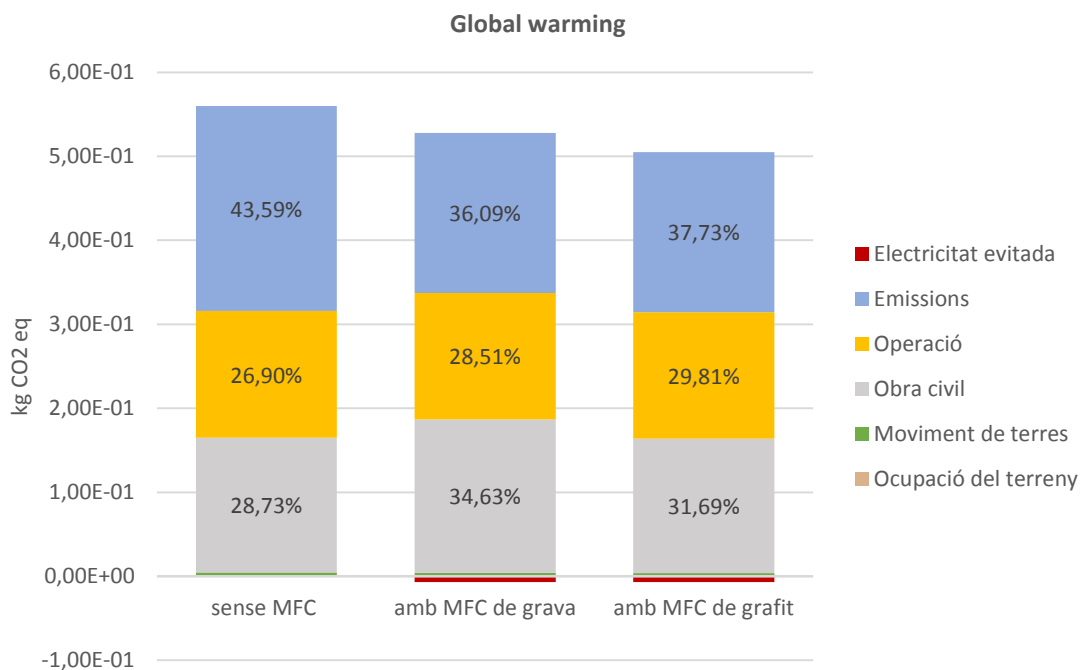
En tots els escenaris l'impacte generat per l'obra civil i per l'operació és molt similar.

Pel què fa a l'impacte de l'obra civil, en tots tres escenaris és la construcció de l'HFCW la que té més impacte. Dins la construcció dels HFCW els plàstics (geomembrana) i el material granular (grava) són els elements que tenen més impacte. Destacar que en els HFCW amb MFC s'hi afegeix l'impacte del grafit (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

L'electricitat produïda per les MFC contribueix a reduir l'impacte global dels escenaris on hi són implementades (2,15% i 2,29% en l'escenari amb MFC de grava i en l'escenari amb MFC de grafit respectivament).

5.1.3. Global warming

	Escenari					
	sense MFC		amb MFC de grava		amb MFC de grafit	
Impact category	Global warming (GWP100a)					
Unit	kg CO2 eq					
Total	5,60E-01		5,21E-01		4,98E-01	
Ocupació del terreny	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Moviment de terres	4,40E-03	0,79%	4,05E-03	0,77%	3,88E-03	0,77%
Obra civil (materials i manufacturació)	1,61E-01	28,73%	1,83E-01	34,63%	1,60E-01	31,69%
Operació	1,51E-01	26,90%	1,51E-01	28,51%	1,51E-01	29,81%
Emissions	2,44E-01	43,59%	1,91E-01	36,09%	1,91E-01	37,73%
Electricitat evitada	0,00E+00		-6,80E-03		-6,80E-03	



Gràfica 3. Resultats de la categoria d'impacte Global warming (CW sense MFC i CW amb MFC).
(Elaboració pròpia)

L'escenari sense MFC té el major impacte total, si bé sense massa diferència respecte dels altres dos escenaris (1,07 vegades l'impacte de l'escenari amb MFC de grava i 1,12 vegades l'impacte de l'escenari amb MFC de grafit).

En tots els escenaris les emissions generen el major impacte respecte del total de l'impacte, essent un 43,59%, un 36,09% i un 37,73% en l'escenari sense MFC, l'escenari amb MFC de grava i l'escenari amb MFC de grafit respectivament.

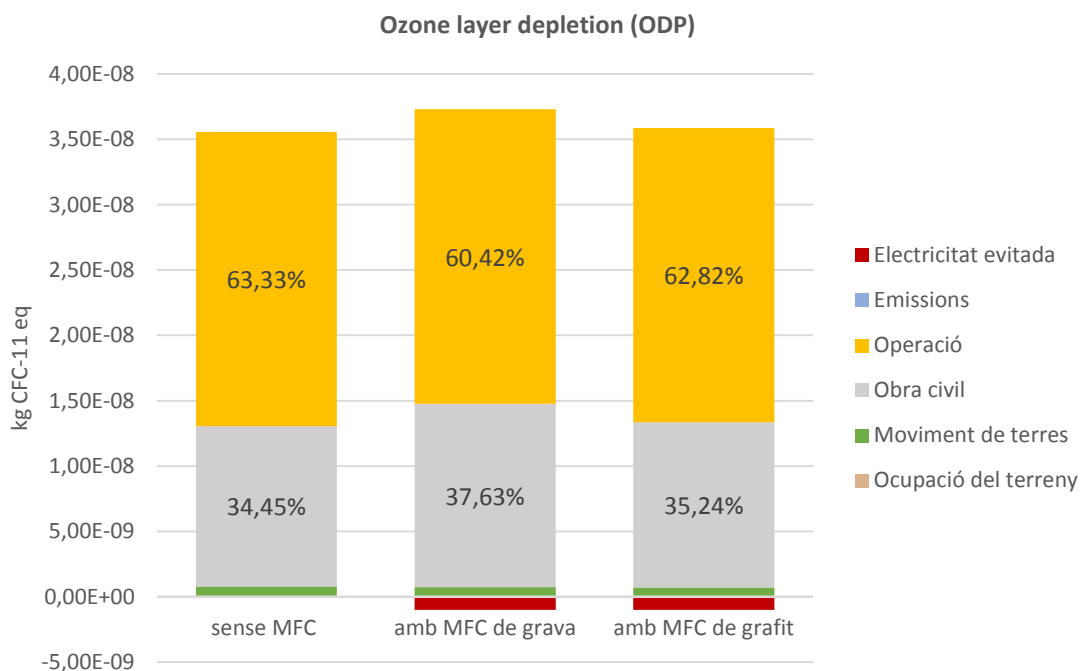
En tots tres escenaris, l'impacte de les emissions és produït principalment pel CH₄ (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

L'obra civil és la segona causa més important d'aquesta categoria d'impacte en els tres escenaris. Dins de l'obra civil és la construcció de l'HFCW la que té més impacte essent el material granular (grava) l'element que més impacta. A part, en tots els escenaris cal afegir-hi l'impacte dels plàstics (geomembrana); en els escenaris amb MFC cal afegir-hi, també, l'impacte del grafit i en l'escenari amb MFC de grava s'hi afegeix, a més, l'impacte dels metalls (malla metàl·lica) (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

L'electricitat produïda per les MFC contribueix a reduir l'impacte global dels escenaris on hi són implementades (1,29% i 1,35% en l'escenari amb MFC de grava i en l'escenari amb MFC de grafit respectivament).

5.1.4. Ozone layer depletion

	Escenari					
	sense MFC		amb MFC de grava		amb MFC de grafit	
Impact category	Ozone layer depletion (ODP)					
Unit	kg CFC-11 eq					
Total	3,56E-08		3,63E-08		3,49E-08	
Ocupació del terreny	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Moviment de terres	7,90E-10	2,22%	7,26E-10	1,95%	6,96E-10	1,94%
Obra civil (materials i manufacturació)	1,23E-08	34,45%	1,40E-08	37,63%	1,26E-08	35,24%
Operació	2,25E-08	63,33%	2,25E-08	60,42%	2,25E-08	62,82%
Emissions	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Electricitat evitada	0,00E+00		-1,02E-09		-1,02E-09	



Gràfica 4. Resultats de la categoria d'impacte Ozone Layer Depletion (CW sense MFC i CW amb MFC).
(Elaboració pròpia)

L'escenari amb MFC de grava té el major impacte total, si bé sense massa diferència respecte dels altres dos escenaris (1,02 vegades l'impacte de l'escenari sense MFC i 1,04 vegades l'impacte de l'escenari amb MFC de grafit).

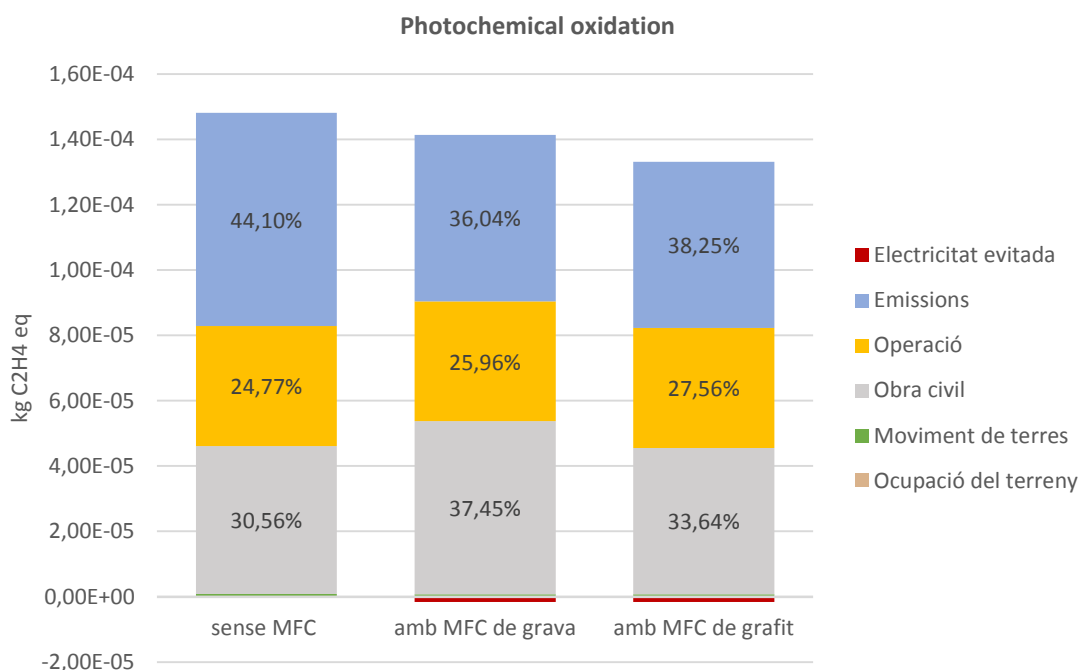
En tots els escenaris, l'operació genera, amb diferència, el major impacte (més del 60% respecte de total de la categoria d'impacte) seguit de l'obra civil.

Pel què fa a l'impacte de l'obra civil, en tots tres escenaris és la construcció de l'HFCW la que té més impacte. Dins la construcció dels HFCW el material granular (grava) és l'element que té més impacte. En els escenaris amb MFC cal afegir-hi també el grafit com a segon element que té més impacte i en l'escenari amb MFC de grava s'hi afegeix l'impacte dels metalls (malla metàl·lica) (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

L'electricitat produïda per les MFC contribueix a reduir l'impacte global dels escenaris on hi són implementades (2,73% i 2,84% en l'escenari amb MFC de grava i en l'escenari amb MFC de grafit respectivament).

5.1.5. Photochemical oxidation

	Escenari					
	sense MFC		amb MFC de grava		amb MFC de grafit	
Impact category	Photochemical oxidation					
Unit	kg C2H4 eq					
Total	1,48E-04		1,40E-04		1,32E-04	
Ocupació del terreny	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Moviment de terres	8,43E-07	0,57%	7,74E-07	0,55%	7,42E-07	0,56%
Obra civil (materials i manufacturació)	4,53E-05	30,56%	5,29E-05	37,45%	4,48E-05	33,64%
Operació	3,67E-05	24,77%	3,67E-05	25,96%	3,67E-05	27,56%
Emissions	6,53E-05	44,10%	5,09E-05	36,04%	5,09E-05	38,25%
Electricitat evitada	0,00E+00		-1,66E-06		-1,66E-06	



Gràfica 5. Resultats de la categoria d'impacte Photochemical oxidation (CW sense MFC i CW amb MFC).
(Elaboració pròpia)

L'escenari sense MFC té el major impacte total, si bé sense massa diferència respecte dels altres dos escenaris (1,06 vegades l'impacte de l'escenari amb MFC de grava i 1,12 vegades l'impacte de l'escenari amb MFC de grafit).

En els escenaris sense MFC i amb MFC de grafit les emissions generen major impacte, seguit de l'obra civil i l'operació. Tanmateix, en l'escenari amb MFC de grava l'obra civil genera més impacte que les emissions tot i que no hi ha massa diferència.

En tots tres escenaris, l'impacte de les emissions és produït principalment pel CH₄ (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

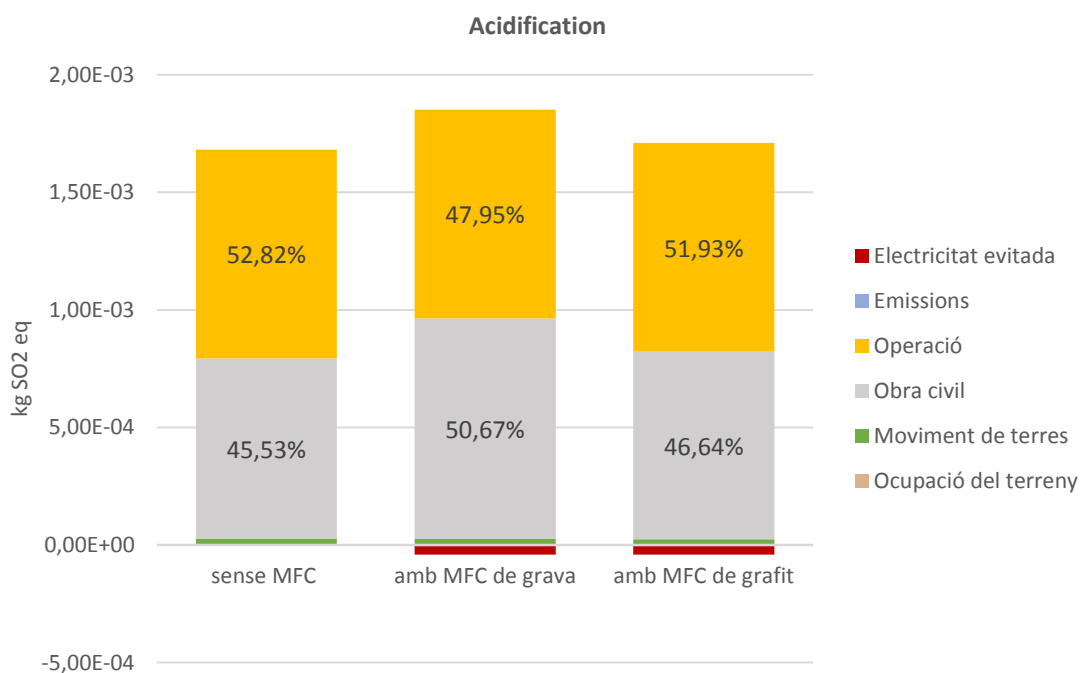
Pel què fa a l'impacte de l'obra civil, en tots tres escenaris és la construcció de l'HFCW la que té més impacte. Dins la construcció dels HFCW el material granular (grava) és l'element que té més impacte. En tots els escenaris cal afegir-hi l'impacte dels plàstics (geomembrana); en els

escenaris amb MFC cal afegir-hi, també, l'impacte del grafit i en l'escenari amb MFC de grava s'hi afegeix, a més, l'impacte dels metalls (malla metàl·lica) (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

L'electricitat produïda per les MFC contribueix a reduir l'impacte global dels escenaris on hi són implementades (1,17% i 1,24% en l'escenari amb MFC de grava i en l'escenari amb MFC de grafit respectivament).

5.1.6. Acidification

	Escenari					
	sense MFC		amb MFC de grava		amb MFC de grafit	
Impact category	Acidification					
Unit	kg SO2 eq					
Total	1,68E-03		1,81E-03		1,67E-03	
Ocupació del terreny	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Moviment de terres	2,78E-05	1,65%	2,54E-05	1,37%	2,43E-05	1,42%
Obra civil (materials i manufacturació)	7,66E-04	45,53%	9,38E-04	50,67%	7,98E-04	46,64%
Operació	8,88E-04	52,82%	8,88E-04	47,95%	8,88E-04	51,93%
Emissions	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Electricitat evitada	0,00E+00		-4,01E-05		-4,01E-05	



Gràfica 6. Resultats de la categoria d'impacte Acidification (CW sense MFC i CW amb MFC).
(Elaboració pròpia)

L'escenari amb MFC de grava té el major impacte total, si bé sense massa diferència respecte dels altres dos escenaris (1,07 vegades l'impacte de l'escenari sense MFC i 1,08 vegades l'impacte de l'escenari amb MFC de grafit).

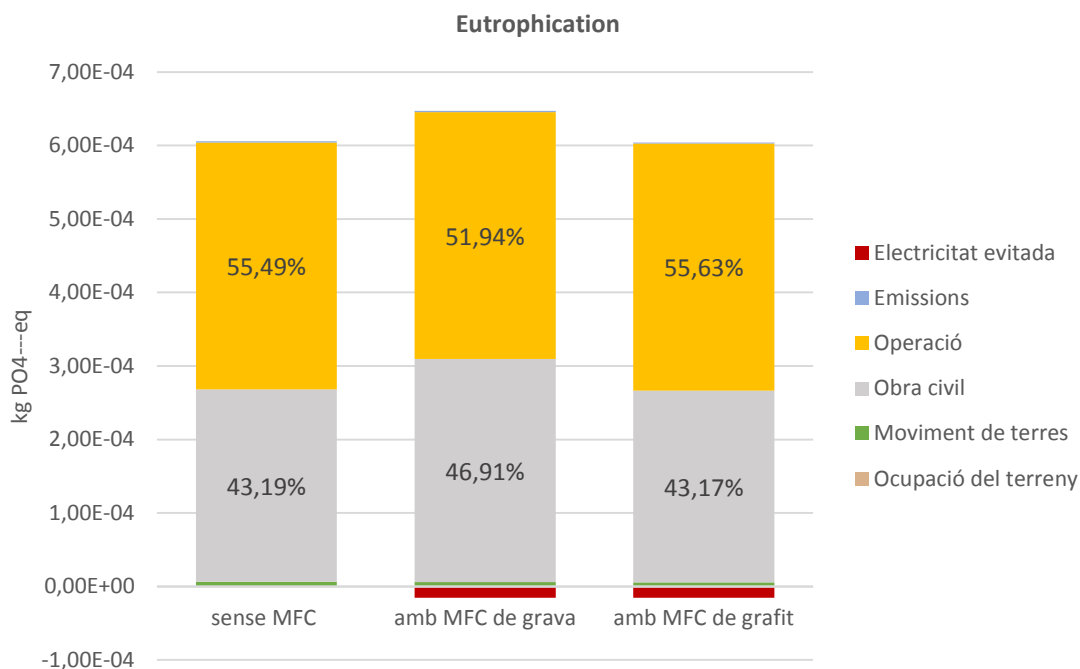
En tots els escenaris l'impacte generat per l'operació i l'obra civil és similar. Únicament remarcar que en l'escenari amb MFC de grava l'impacte de l'obra civil és una mica més gran que el de l'operació.

Pel què fa a l'impacte de l'obra civil, en tots tres escenaris és la construcció de l'HFCW la que té més impacte. Dins la construcció dels HFCW, en l'escenari sense MFC, el material granular (grava) és l'element que té més impacte seguit dels plàstics (geomembrana). En l'escenari amb MFC de grava també és el material granular l'element que té més impacte, seguit del grafit i dels metalls (malla metàl·lica). Finalment, en l'escenari amb MFC de grafit és precisament el grafit el que té més impacte, seguit del material granular (grava) i dels plàstics (geomembrana) (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

L'electricitat produïda per les MFC contribueix a reduir l'impacte global dels escenaris on hi són implementades (2,17% i 2,35% en l'escenari amb MFC de grava i en l'escenari amb MFC de grafit respectivament).

5.1.7. Eutrophication

	Escenari					
	sense MFC		amb MFC de grava		amb MFC de grafit	
Impact category	Eutrophication					
Unit	kg PO4--- eq					
Total	6,06E-04		6,32E-04		5,89E-04	
Ocupació del terreny	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%	0,00E+00	0,00%
Moviment de terres	6,51E-06	1,07%	5,96E-06	0,92%	5,71E-06	0,94%
Obra Civil (materials i manufacturació)	2,62E-04	43,19%	3,04E-04	46,91%	2,61E-04	43,17%
Operació	3,36E-04	55,49%	3,36E-04	51,94%	3,36E-04	55,63%
Emissions	1,52E-06	0,25%	1,52E-06	0,23%	1,52E-06	0,25%
Electricitat evitada	0,00E+00		-1,52E-05		-1,52E-05	



Gràfica 7. Resultats de la categoria d'impacte Eutrophication (CW sense MFC i CW amb MFC).
(Elaboració pròpia)

L'escenari amb MFC de grava té el major impacte total, si bé sense massa diferència respecte dels altres dos escenaris (1,04 vegades l'impacte de l'escenari sense MFC i 1,07 vegades l'impacte de l'escenari amb MFC de grafit).

En tots els escenaris l'impacte generat per l'operació i l'obra civil és similar però l'impacte de l'operació sempre és superior.

Pel què fa a l'impacte de l'obra civil, en tots tres escenaris és la construcció de l'HFCW la que té més impacte. Dins la construcció dels HFCW el material granular (grava) és l'element que té més impacte. En l'escenari sense MFC el segon element que genera més impacte és el plàstic (geomembrana); en els escenaris amb MFC cal afegir-hi com a segon element el grafit i en l'escenari amb MFC de grava s'hi afegeix, a més, l'impacte dels metalls (malla metàl·lica) (veure aquests resultats a l'Annex 2. Treballs de l'anàlisi del cicle de vida; apartat 2. *Taules de resultats; escenaris principals*).

L'electricitat produïda per les MFC contribueix a reduir l'impacte global dels escenaris on hi són implementades (2,35% i 2,51% en l'escenari amb MFC de grava i en l'escenari amb MFC de grafit respectivament).

5.1.8. Resum dels impactes ambientals en els escenaris principals

Fet l'anàlisi ambiental dels escenaris sense MFC, amb MFC de grava i amb MFC de grafit es constata que:

- Per totes les categories d'impacte analitzades els resultats són semblants en els tres escenaris principals excepte pel què fa a la categoria de l'*Abiotic depletion*. En aquesta categoria, l'escenari amb MFC de grava a causa principalment de l'ús dels metalls (malla metàl·lica) genera més impacte que els altres dos escenaris (1,87 vegades l'impacte de l'escenari sense MFC i 2,08 vegades l'impacte de l'escenari amb MFC de grafit).
- L'electricitat evitada redueix l'impacte en tots els escenaris on hi ha MFC implementades encara que aquesta reducció sigui mínima (sempre inferior al 3%).
- En tots els escenaris el moviment de terres té un impacte gairebé despreciable.
- En tots els escenaris i en totes les categories d'impacte, les causes principals d'impacte són l'obra civil (materials i manufacturació), l'operació (consum energètic de la planta en funcionament) i les emissions de gasos d'efecte hivernacle.
- En tots els escenaris la construcció de l'HFCW és la part que genera més impacte fruit de l'ús de la geomembrana (plàstics) i del material granular (grava). A més en els escenaris amb MFC l'ús de grafit contribueix a augmentar l'impacte i en l'escenari amb MFC de grava s'hi suma l'ús de malla metàl·lica.
- Pel què fa a les emissions, el metà (CH_4) és el que genera més impacte.

Així doncs, els impactes de les categories analitzades són tan semblants entre tots els escenaris, excepte en la categoria de l'*Abiotic depletion*, que és difícil d'afirmar que un sigui millor que els altres. Ara bé, sí que es pot destacar que s'aconsegueix una reducció de la superfície específica dels escenaris amb MFC respecte de l'escenari sense MFC (Taula 13).

Escenari	Superfície	% de reducció respecte de l'escenari sense MFC
<i>Sense MFC</i>	8.190,00 m ²	
<i>Amb MFC de grava</i>	7.166,25 m ²	-12,50%
<i>Amb MFC de grafit</i>	6.688,50 m ²	-18,33%

Taula 13. Reduccions de superfícies dels escenaris amb MFC respecte de l'escenari sense MFC. (Elaboració pròpia a partir dels dimensionaments prèviament calculats)

Per tant, l'escenari amb MFC de grafit sembla el més adequat per substituir l'escenari sense MFC perquè comporta la major reducció de superfície específica i té un impacte ambiental similar al de la resta d'escenaris.

5.1.9. Anàlisi de sensibilitat

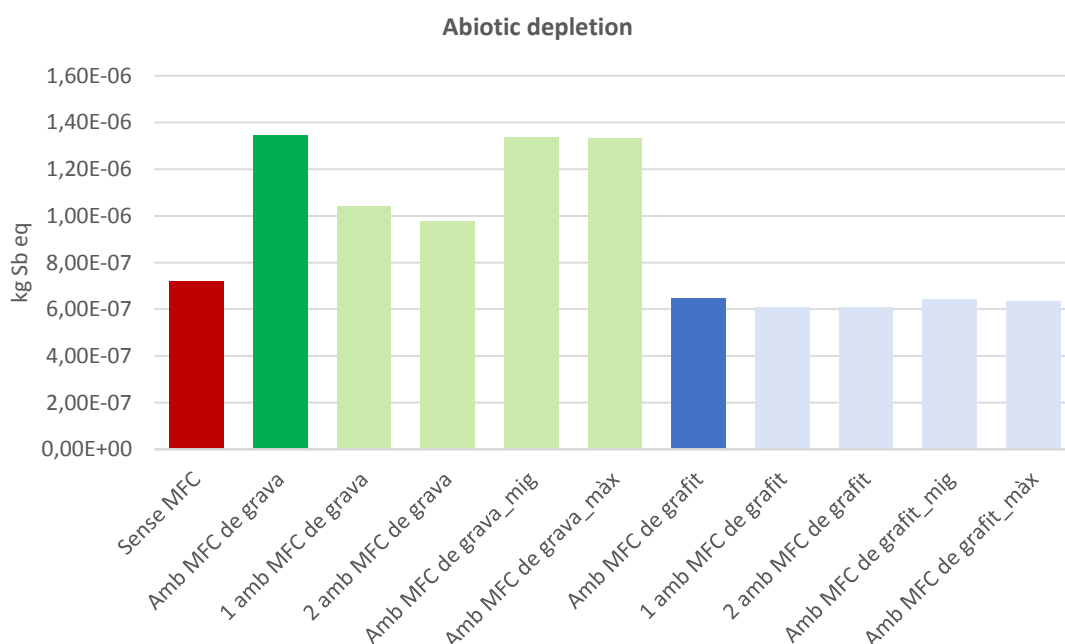
En aquesta anàlisi de sensibilitat es canvien els valors de les variables de la millora de l'eficiència de tractament de les MFC i de l'electricitat generada per aquestes. Del recàlcul de l'ACV efectuat se n'extreu, a grans trets, per a cadascun dels impactes analitzats el següent:

- Abiotic depletion:

A la taula i la gràfica següent es pot veure que modificant la variable de la millora de l'eficiència de tractament de les MFC en l'escenari amb MFC de grava s'aconsegueix una reducció d'aquest impacte del 22,52% i del 27,46% respecte de l'escenari principal amb MFC de grava. Tanmateix l'impacte en aquesta categoria continua essent superior respecte de l'escenari sense MFC (44,41% i 35,21%). Ara bé, quan aquesta variable es modifica a l'escenari amb MFC de grafit la reducció no és significativa ja que no supera el 15% respecte de l'escenari principal.

Quan es modifica la variable de l'electricitat generada per les MFC els resultats que s'obtenen no comporten una variació significativa respecte dels resultats obtinguts en escenaris amb MFC de grava i amb MFC de grafit.

Impact category	Abiotic depletion		
Unit	kg Sb eq		
Total	9,90E-06	% de reducció respecte de l'escenari principal	% d'augment/de reducció respecte de l'escenari sense MFC
Sense MFC	7,22E-07		
Amb MFC de grava	1,35E-06		
1 amb MFC de grava	1,04E-06	-22,52%	44,41%
2 amb MFC de grava	9,76E-07	-27,46%	35,21%
Amb MFC de grava_mig	1,34E-06	-0,48%	85,50%
Amb MFC de grava_màx	1,33E-06	-1,03%	84,47%
Amb MFC de grafit	6,48E-07		
1 amb MFC de grafit	6,09E-07	-6,14%	-15,67%
2 amb MFC de grafit	6,07E-07	-6,36%	-15,87%
Amb MFC de grafit_mig	6,42E-07	-0,99%	-11,05%
Amb MFC de grafit_màx	6,35E-07	-2,13%	-12,07%

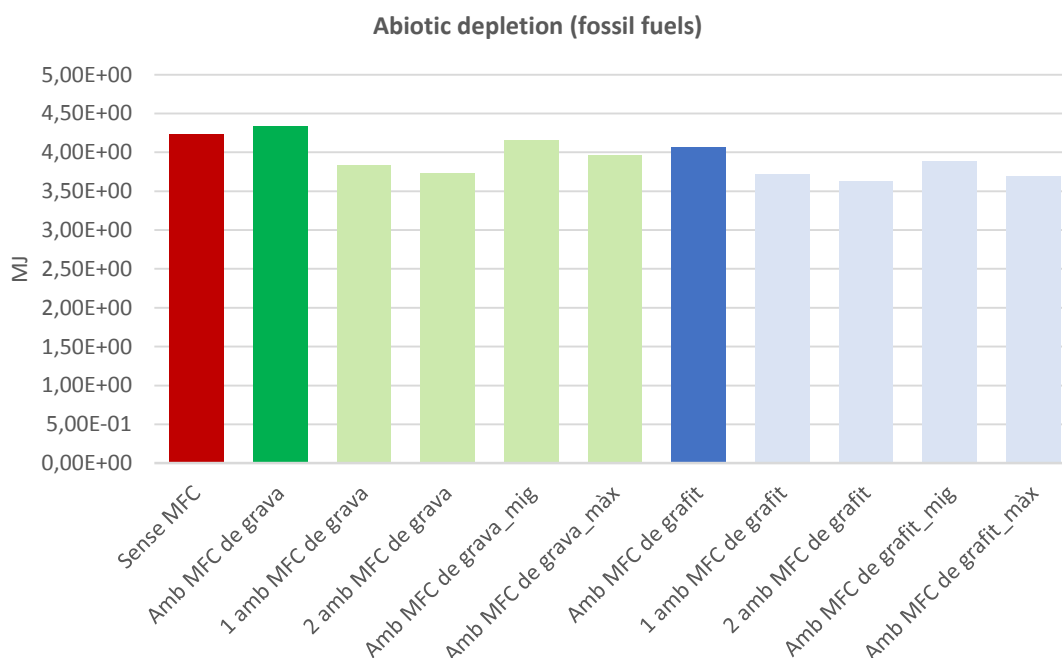


Gràfica 8. Resultats de la categoria d'impacte Abiotic depletion (anàlisi de sensibilitat).
(Elaboració pròpia)

- Abiotic depletion (fossil fuels), Global warming, Ozone layer depletion, Photochemical oxidation, Acidification i Eutrophication:

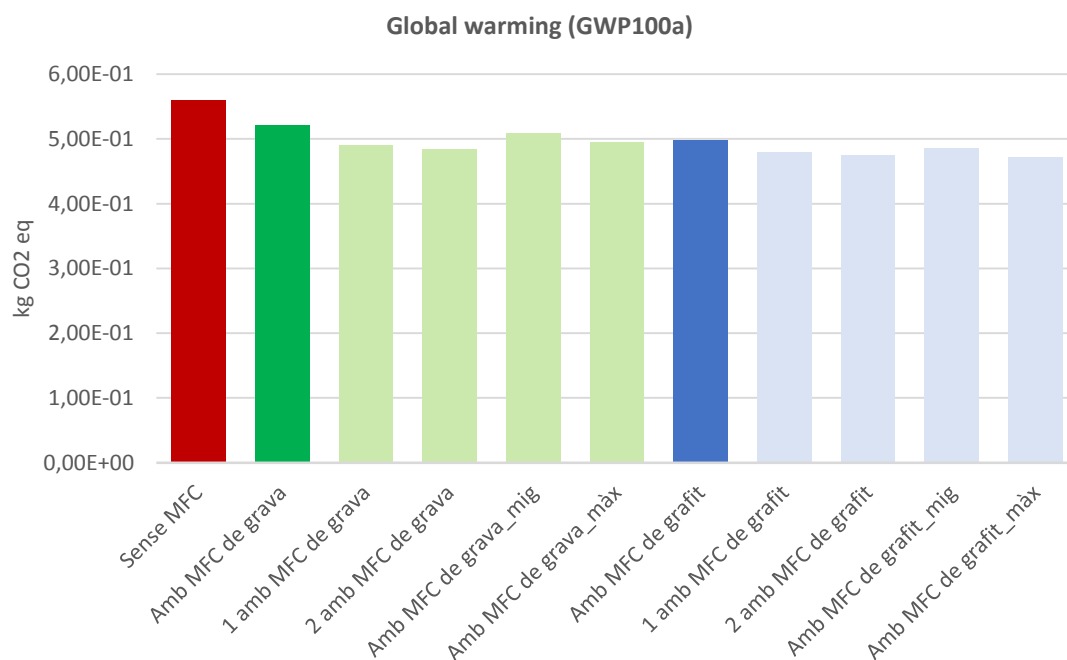
A les taules i les gràfiques que segueixen es pot veure que modificant les variables de la millora d'eficiència de tractament de les MFC i de l'electricitat generada per aquestes, tant en l'escenari amb MFC de grava com en l'escenari amb MFC de grafit, els resultats són similars i no s'observa una reducció significativa de l'impacte respecte dels escenaris principals en aquestes categories (reduccions inferiors al 15% respecte dels escenaris principals).

Impact category	Abiotic depletion (fossil fuels)	
Unit	MJ	
Total	4,32E+01	% de reducció respecte de l'escenari principal
Sense MFC	4,23E+00	
Amb MFC de grava	4,33E+00	
1 amb MFC de grava	3,83E+00	-11,62%
2 amb MFC de grava	3,73E+00	-14,05%
Amb MFC de grava_mig	4,16E+00	-4,07%
Amb MFC de grava_màx	3,95E+00	-8,77%
Amb MFC de grafit	4,06E+00	
1 amb MFC de grafit	3,72E+00	-8,44%
2 amb MFC de grafit	3,63E+00	-10,61%
Amb MFC de grafit_mig	3,89E+00	-4,34%
Amb MFC de grafit_màx	3,68E+00	-9,36%



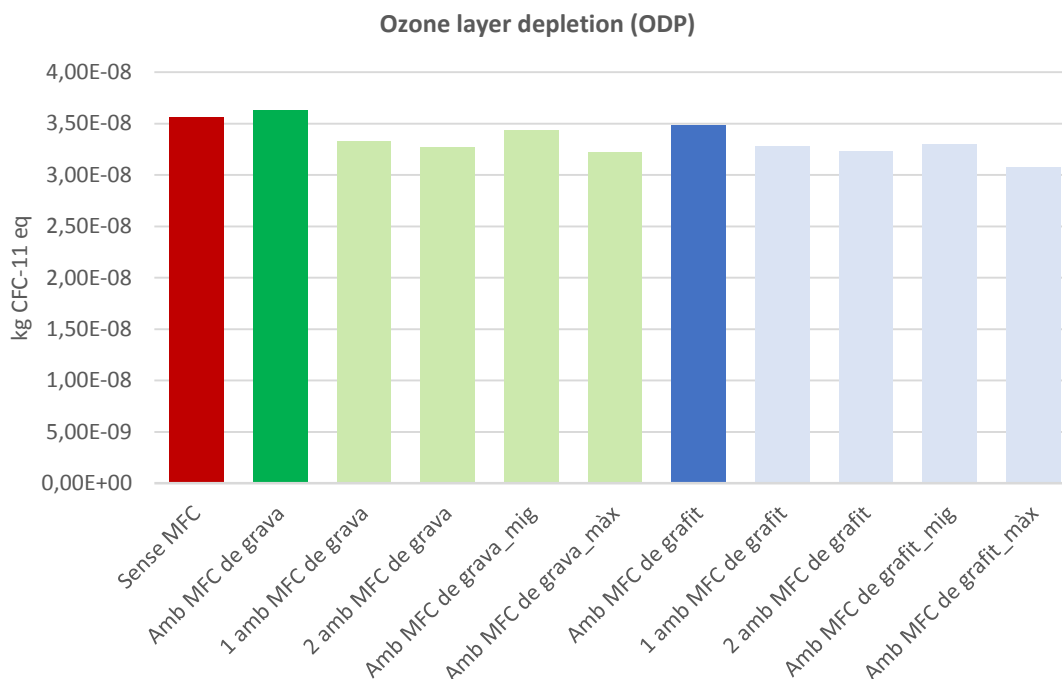
Gràfica 9. Resultats de la categoria d'impacte Abiotic depletion (fossil fuels) (anàlisi de sensibilitat).
(Elaboració pròpia)

Impact category	Global warming (GWP100a)	
Unit	kg CO2 eq	
Total	5,47E+00	% de reducció respecte de l'escenari principal
Sense MFC	5,60E-01	
Amb MFC de grava	5,21E-01	
1 amb MFC de grava	4,90E-01	-6,07%
2 amb MFC de grava	4,84E-01	-7,14%
Amb MFC de grava_mig	5,09E-01	-2,42%
Amb MFC de grava_màx	4,94E-01	-5,22%
Amb MFC de grafit	4,98E-01	
1 amb MFC de grafit	4,79E-01	-3,90%
2 amb MFC de grafit	4,75E-01	-4,69%
Amb MFC de grafit_mig	4,86E-01	-2,53%
Amb MFC de grafit_màx	4,71E-01	-5,46%



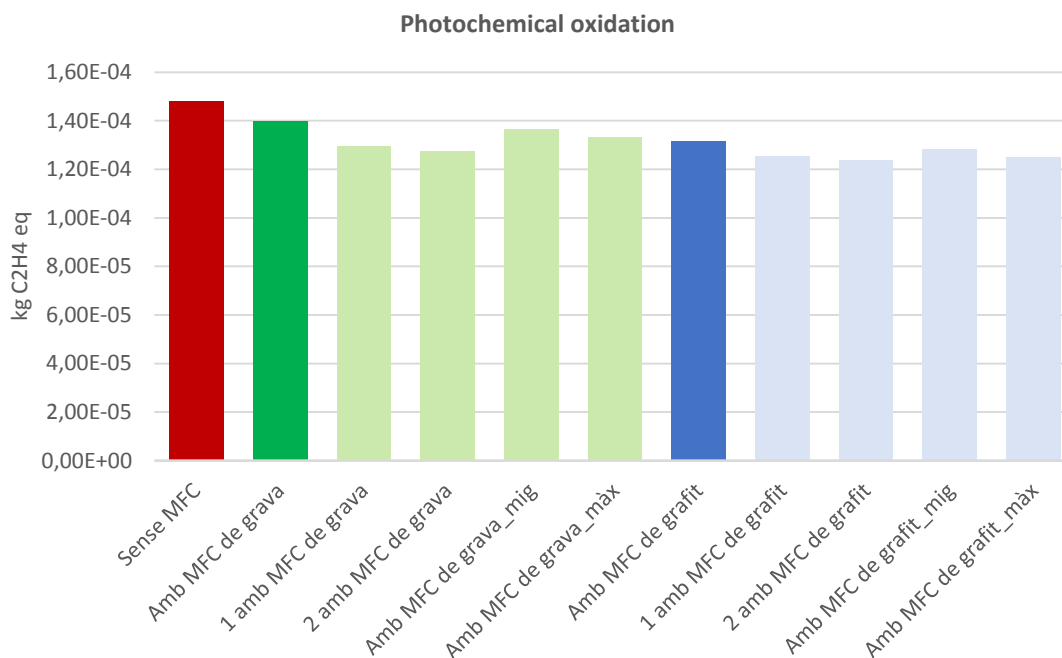
Gràfica 10. Resultats de la categoria d'impacte Global warming (anàlisi de sensibilitat).
(Elaboració pròpia)

Impact category	Ozone layer depletion (ODP)	
Unit	kg CFC-11 eq	
Total	3,68E-07	% de reducció respecte de l'escenari principal
Sense MFC	3,56E-08	
Amb MFC de grava	3,63E-08	
1 amb MFC de grava	3,33E-08	-8,20%
2 amb MFC de grava	3,27E-08	-9,85%
Amb MFC de grava_mig	3,44E-08	-5,21%
Amb MFC de grava_màx	3,22E-08	-11,22%
Amb MFC de grafit	3,49E-08	
1 amb MFC de grafit	3,28E-08	-5,95%
2 amb MFC de grafit	3,23E-08	-7,43%
Amb MFC de grafit_mig	3,30E-08	-5,42%
Amb MFC de grafit_màx	3,08E-08	-11,68%



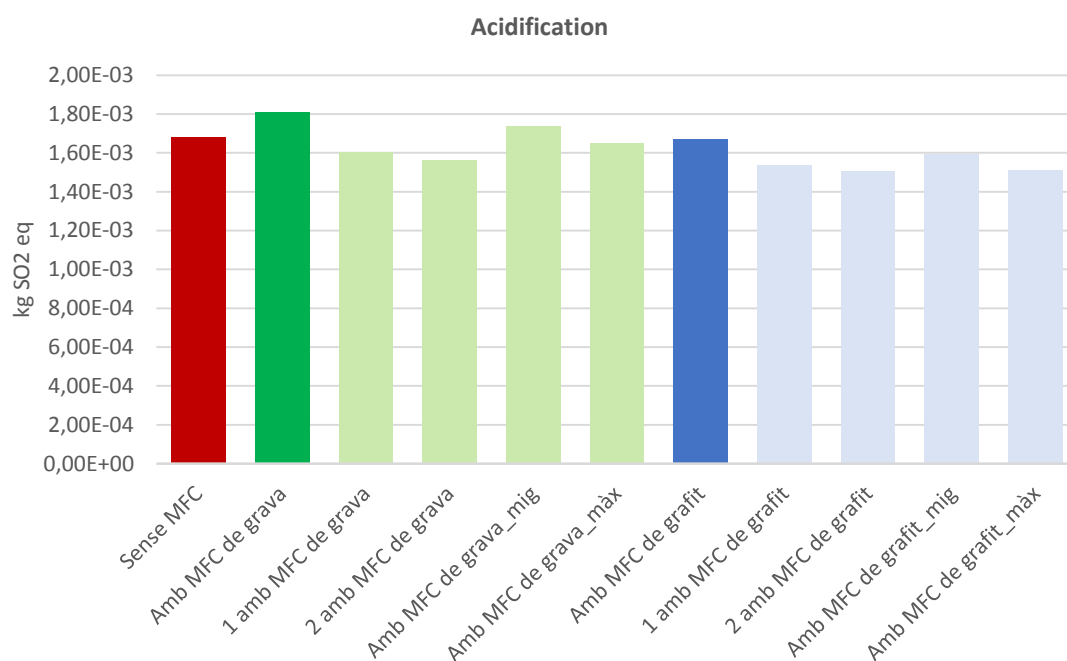
Gràfica 11 Resultats de la categoria d'impacte Ozone layer depletion (anàlisi de sensibilitat).
(Elaboració pròpia)

Impact category	Photochemical oxidation	
Unit	kg C ₂ H ₄ eq	
Total	1,45E-03	% de reducció respecte de l'escenari principal
Sense MFC	1,48E-04	
Amb MFC de grava	1,40E-04	
1 amb MFC de grava	1,29E-04	-7,42%
2 amb MFC de grava	1,27E-04	-8,86%
Amb MFC de grava_mig	1,37E-04	-2,20%
Amb MFC de grava_màx	1,33E-04	-4,75%
Amb MFC de grafit	1,32E-04	
1 amb MFC de grafit	1,25E-04	-4,72%
2 amb MFC de grafit	1,24E-04	-5,78%
Amb MFC de grafit_mig	1,28E-04	-2,34%
Amb MFC de grafit_màx	1,25E-04	-5,04%



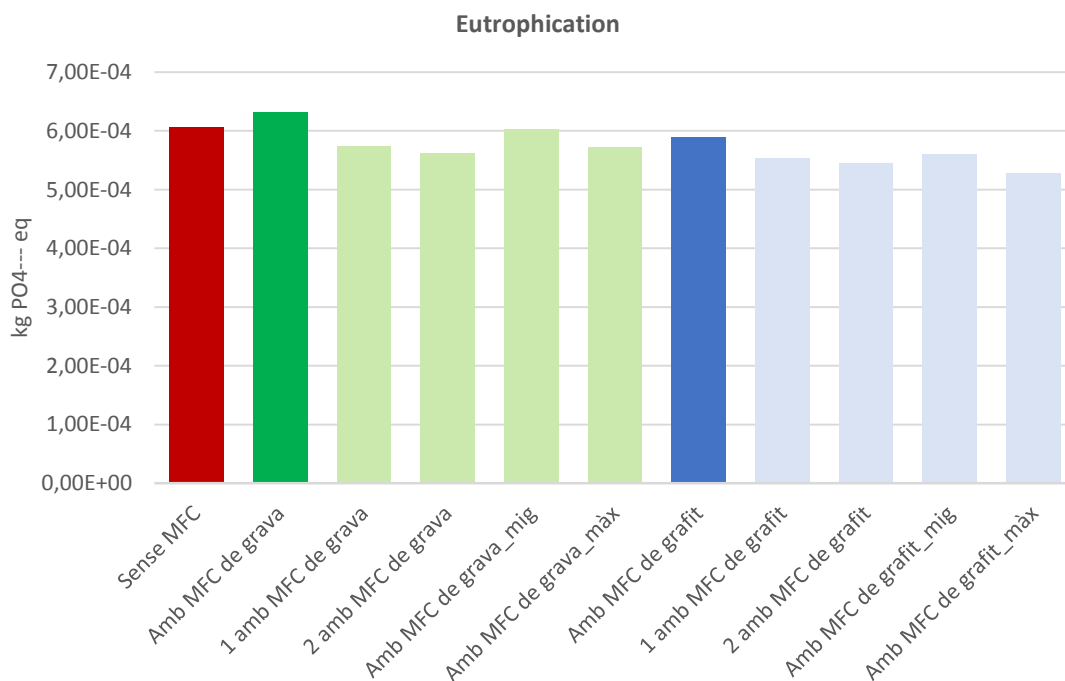
Gràfica 12. Resultats de la categoria d'impacte Photochemical oxidation (anàlisi de sensibilitat).
(Elaboració pròpia)

Impact category	Acidification	
Unit	kg SO2 eq	
Total	1,79E-02	% de reducció respecte de l'escenari principal
Sense MFC	1,68E-03	
Amb MFC de grava	1,81E-03	
1 amb MFC de grava	1,60E-03	-11,46%
2 amb MFC de grava	1,56E-03	-13,86%
Amb MFC de grava_mig	1,74E-03	-4,11%
Amb MFC de grava_màx	1,65E-03	-8,85%
Amb MFC de grafit	1,67E-03	
1 amb MFC de grafit	1,54E-03	-7,90%
2 amb MFC de grafit	1,50E-03	-9,90%
Amb MFC de grafit_mig	1,60E-03	-4,46%
Amb MFC de grafit_màx	1,51E-03	-9,61%



Gràfica 13. Resultats de la categoria d'impacte Acidification (anàlisi de sensibilitat).
(Elaboració pròpia)

Impact category	Eutrophication	
Unit	kg PO4--- eq	
Total	6,32E-03	% de reducció respecte de l'escenari principal
Sense MFC	6,06E-04	
Amb MFC de grava	6,32E-04	
1 amb MFC de grava	5,73E-04	-9,31%
2 amb MFC de grava	5,62E-04	-11,10%
Amb MFC de grava_mig	6,04E-04	-4,46%
Amb MFC de grava_màx	5,71E-04	-9,61%
Amb MFC de grafit	5,89E-04	
1 amb MFC de grafit	5,53E-04	-6,17%
2 amb MFC de grafit	5,44E-04	-7,56%
Amb MFC de grafit_mig	5,61E-04	-4,79%
Amb MFC de grafit_màx	5,28E-04	-10,31%



Gràfica 14. Resultats de la categoria d'impacte Eutrophication (anàlisi de sensibilitat).
(Elaboració pròpia)

- Resum dels resultats de l'anàlisi de sensibilitat:

En primer lloc dir que, en totes les categories d'impacte, excepte en la categoria d'impacte de l'*Abiotic depletion*, els resultats de l'anàlisi de sensibilitat quan es canvia la variable de la millora de l'eficiència de tractament en els dos escenaris amb MFC són similars als resultats dels escenaris principals (els impactes es redueixen menys d'un 15% respecte dels escenaris principals). En la categoria de l'*Abiotic depletion*, quan es canvia la variable esmentada en els escenaris amb MFC de grava s'aconsegueix una reducció de l'impacte que pot qualificar-se de significativa ja que supera el 15% respecte de l'escenari principal amb MFC de grava (reduccions del 22,52% i del 27,46%).

A més, convé destacar que amb la modificació de la variable de l'eficiència de tractament en els escenaris amb MFC, la superfície específica d'aquests es redueix encara més respecte de l'escenari sense MFC (Taula 14).

Escenari	Superfície	% de reducció respecte de l'escenari sense MFC
<i>Sense MFC</i>	8.190,00 m ²	
<i>Amb MFC de grava</i>	7.166,25 m ²	-12,50%
<i>Amb MFC de grafit</i>	6.688,50 m ²	-18,33%
<i>1 amb grava i amb grafit</i> (75% de millora de l'eficiència de tractament)	4.761,00 m ²	-41,87%
<i>2 amb grava i amb grafit</i> (85% de millora de l'eficiència de tractament)	4.125,00 m ²	-49,63%

Taula 14. Reduccions de superfícies dels escenaris amb MFC respecte de l'escenari sense MFC suposant una millora de l'eficiència de tractament de les MFC.

(Elaboració pròpia a partir dels dimensionaments prèviament calculats)

En segon lloc dir que quan es canvia la variable de l'electricitat generada per les MFC, els resultats de l'anàlisi de sensibilitat són molt similars als dels escenaris principals en totes les categories d'impacte (reduccions no significatives, inferiors al 15%).

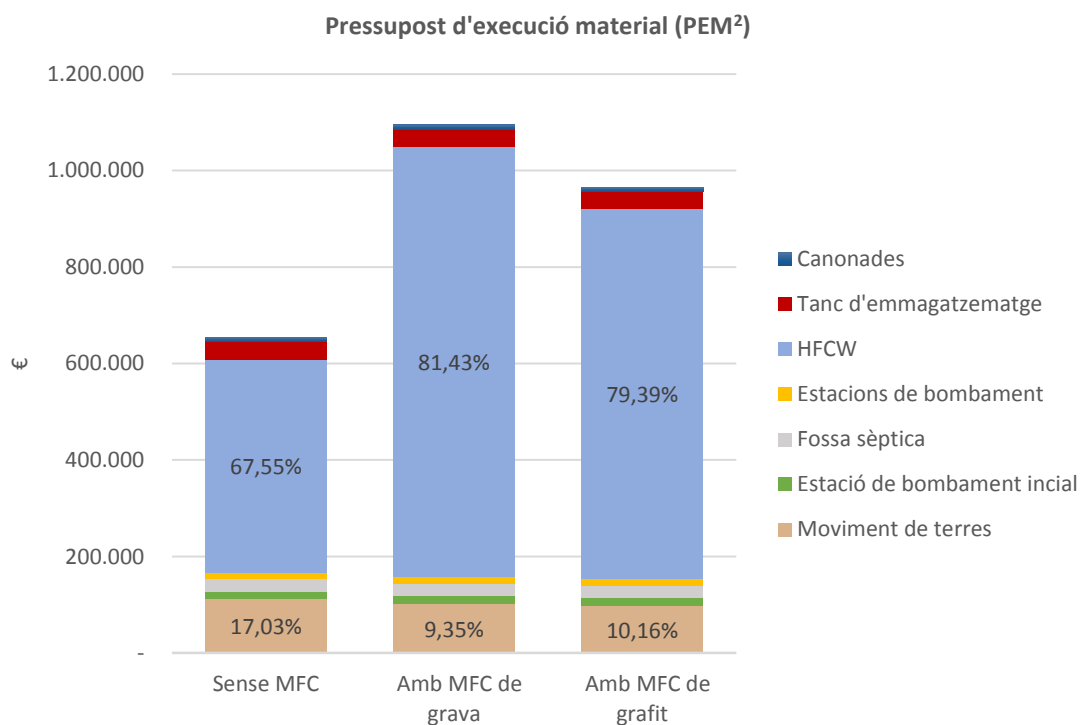
En conseqüència dir que, els resultats de l'anàlisi de sensibilitat efectuat confirmen la robustesa dels resultats obtinguts a l'ACV.

5.2. Anàlisi econòmica

En aquest apartat es mostra l'anàlisi econòmica dels sistemes principals a partir dels pressuposts elaborats. Per més detall d'aquesta anàlisi, es pot consultar l'Annex 3. Treballs de l'anàlisi econòmica; apartat 1. *Pressuposts; sistemes principals*.

	Sistema					
	sense MFC		amb MFC de grava		amb MFC de grafit	
Concepte	Pressupost d'execució material (PEM²)					
Unitats	€					
Total	654.561,82		1.095.062,24		965.619,48	
Moviment de terres	111.497,75	17,03%	102.396,59	9,35%	98.100,36	10,16%
Estació de bombament inicial	15.832,51	2,42%	15.832,51	1,45%	15.832,51	1,64%
Fossa sèptica	25.428,90	3,88%	25.428,90	2,32%	25.428,90	2,63%
Estacions de bombament dels HFCW	14.048,24	2,15%	14.048,24	1,28%	14.048,24	1,45%
HFCW	442.138,51	67,55%	891.740,09	81,43%	766.593,56	79,39%
Tanc d'emmagatzematge	36.331,58	5,55%	36.331,58	3,32%	36.331,58	3,76%
Sistema de canonades	9.284,33	1,42%	9.284,33	0,85%	9.284,33	0,96%

Sistema	PEM ² (€)	% d'augment respecte l'escenari sense MFC
Sense MFC	654.561,82	
Amb MFC de grava	1.095.062,24	67,30%
Amb MFC de grafit	965.619,48	47,52%



Gràfica 15. Resultats de l'anàlisi econòmica (sistemes principals).
(Elaboració pròpia)

El sistema amb MFC de grava és el que té el PEM² més alt, concretament un 67,30% més que el PEM² del sistema sense MFC.

Destacar que en tots els sistemes el capítol corresponent a la construcció dels HFCW és el més elevat, seguit del capítol de moviment de terres.

Dins del capítol dels HFCW, i de més a menys, els subcapítols que comporten el cost més elevat són, primer, el referent a la llera i, segon, el de protecció i impermeabilització.

En el subcapítol de la llera s'hi inclouen, ordenades de més a menys cost, les partides següents:

- Sistema sense MFC: grava.
- Sistema amb MFC de grava: grafit, malla metàl·lica i grava.
- Sistema amb MFC de grafit: grafit i grava.

En el subcapítol de la protecció i impermeabilització, la partida corresponent a la geomembrana és, en tots els sistemes, la més elevada.

Dintre del capítol de moviment de terres, en tots els sistemes, el subcapítol corresponent als treballs d'excavació és el que té un cost més elevat.

Notar que la resta de capítols (estació de bombament inicial, fossa sèptica, estacions de bombament dels HFCW, tanc d'emmagatzematge i sistema de canonades) tenen el mateix cost en els tres sistemes i, per tant, la diferència entre aquests sistemes rau en els dos capítols esmentats al principi (construcció dels HFCW i moviment de terres).

El cost de construcció d'aquests sistemes i d'un sistema de tractament convencional per HE és el següent:

	Sistema			
	Sense MFC	Amb MFC de grava	Amb MFC de grafit	Convencional
<i>Cost de construcció (€/HE)</i>	436,37	730,04	643,75	540,93 (Cullell, AM., 2015)

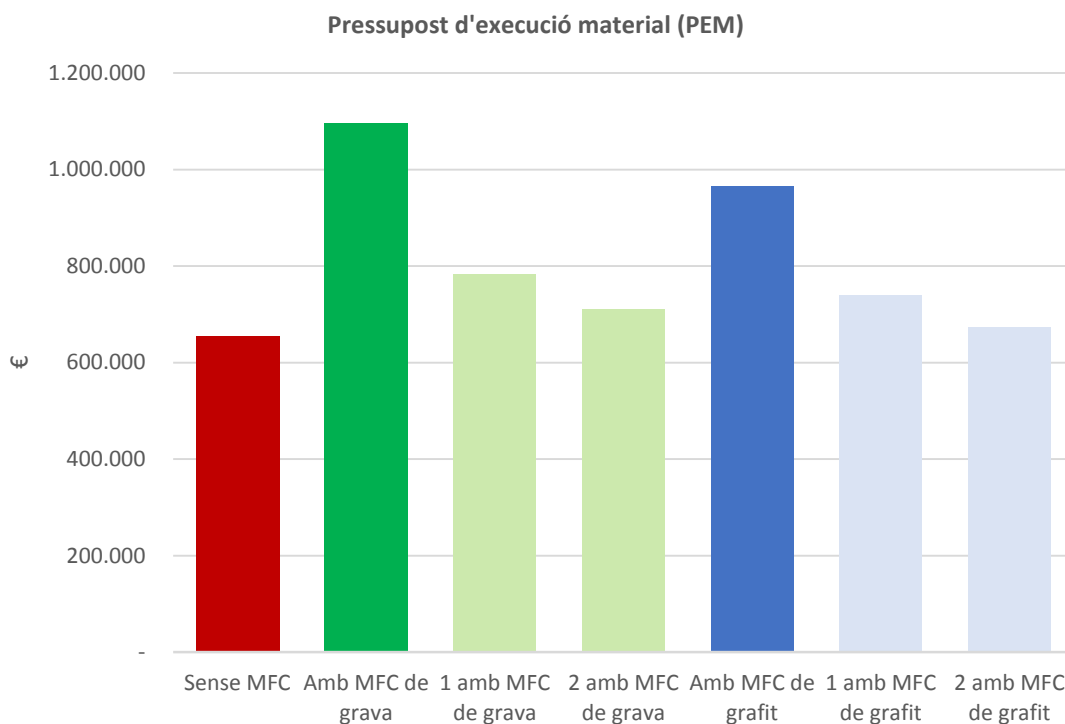
Taula 15. Cost de construcció per HE dels sistemes principals d'HFCW i del sistema convencional.

En resum, tot i que els sistemes amb MFC permeten una reducció de la superfície específica respecte del sistema sense MFC (reduccions del 12,50% i del 18,33% al sistema amb MFC de grava i al sistema amb MFC de grafit, respectivament -Taula 13-) el PEM^2 dels primers continua essent més elevat que el PEM^2 del sistema sense MFC (increments del 67,30% i del 47,52% al sistema amb MFC de grava i al sistema amb MFC de grafit, respectivament -Gràfica 15-). A més, el cost de construcció per HE dels sistemes amb MFC és, fins i tot, major que el d'un sistema de tractament convencional (Taula 15).

Com ja s'ha vist a l'apartat 5.1.9, quan en l'anàlisi de sensibilitat es canvia la variable de la millora d'eficiència de tractament de les MFC, els sistemes resultants tenen una superfície específica encara menor que la dels sistemes principals amb MFC (Taula 14). Aquest fet té un reflex en els pressuposts de manera que el cost associat a la construcció dels sistemes s'abarateix respecte dels escenaris amb MFC de grava i de grafit (Gràfica 16) (veure l'Annex 3. Treballs de l'anàlisi econòmica; apartat 1. Pressuposts; anàlisi de sensibilitat).

Amb tot, l'escenari sense MFC segueix tenint un PEM^2 més baix ja que l'ús del grafit i de la malla metàl·lica en els escenaris amb MFC encareix els pressuposts malgrat se n'hagi reduït la quantitat utilitzada.

Sistema	PEM ² (€)	% d'augment respecte l'escenari sense MFC
Sense MFC	654.561,82	
Amb MFC de grava	1.095.062,24	67,30%
1 amb MFC de grava	782.911,35	19,61%
2 amb MFC de grava	710.966,13	8,62%
Amb MFC de grafit	965.619,48	47,52%
1 amb MFC de grafit	738.824,93	12,87%
2 amb MFC de grafit	673.533,67	2,90%



Gràfica 16. Resultats de l'anàlisi econòmica (anàlisi de sensibilitat, variable millora de l'eficiència de tractament de les MFC).
(Elaboració pròpia)

A més, en aquests sistemes, el cost de construcció del sistema de CW per HE és el següent:

	Sistema							Convencional
	Sense MFC	Amb MFC de grava	1 amb MFC de grava	2 amb MFC de grava	Amb MFC de grafit	1 amb MFC de grafit	2 amb MFC de grafit	
Cost de construcció (€/HE)	436,37	730,04	521,94	458,69	643,75	492,55	449,02	540,93 (Cullell, AM., 2015)

Taula 16. Cost de construcció per HE dels sistemes principals d'HFCW, dels sistemes d'HFCW de l'anàlisi de sensibilitat (variable millora de l'eficiència de tractament) i del sistema convencional.

En resum, tot i que la millora en l'eficiència de tractament permeti una reducció de la superfície específica respecte del sistema sense MFC (reduccions superiors al 40% -Taula 14 -) el PEM² dels sistemes resultants continua essent més elevat que el PEM² del sistema sense MFC (Gràfica 16). Ara bé, el cost de construcció per HE d'aquests sistemes és menor que el d'un sistema de tractament convencional, excepte pel sistema 1 amb MFC de grava (Taula 16).

6. CONCLUSIONS I RECOMANACIONS

A partir dels resultats obtinguts de l'ACV es pot concloure que l'ús de MFC de grava i de grafit en HFCW permet reduir la superfície específica alhora que es mantenen els impactes ambientals respecte d'un HFCW convencional, sense MFC. Així doncs, des del punt de vista ambiental, un HFCW amb MFC podria substituir un HFCW sense MFC. Destacar que dels sistemes amb MFC analitzats el que té una superfície específica menor és el sistema d'HFCW amb MFC de grafit.

Ara bé, des del punt de vista econòmic, quan s'introdueixen MFC en HFCW el cost de construcció s'incrementa considerablement. Amb tot, si s'aconsegueix millorar (augmentar) l'eficiència de tractament d'aquestes MFC, es podrà reduir encara més la superfície específica dels HFCW i això comportarà una reducció del cost de construcció dels sistemes amb MFC a un nivell que podria considerar-se competitiu respecte dels sistemes sense MFC i, sobretot, respecte d'una planta de tractament convencional.

Els resultats de l'anàlisi de sensibilitat efectuat modificant les variables de la millora de l'eficiència de tractament de les MFC i de l'electricitat generada per aquestes confirmen, sense dubte, la robustesa dels resultats obtinguts a l'ACV.

Com que a les anàlisis efectuades s'ha comprovat que l'obra civil, l'operació i les emissions causen un major impacte ambiental potser caldria incidir en aquests factors per intentar reduir-lo.

Pel què fa a l'obra civil, més concretament la part de l'HFCW, caldria veure en quina mesura seria possible substituir els materials que generen més impacte (grava, plàstics, grafit i malla metàl·lica) per uns que en generessin menys. A més, si aquests materials tinguessin un cost inferior als actuals s'incidiria, alhora, en la reducció del cost de construcció dels sistemes d'HFCW.

En aquest sentit es recomana fer un ACV utilitzant nous materials pels HFCW (materials més sostenibles, subproductes d'altres materials, etc.) amb l'objectiu de reduir o mantenir la superfície específica i l'impacte ambiental. També caldria analitzar l'impacte econòmic d'aquests nous materials en la construcció dels HFCW.

Com que s'ha comprovat que un HFCW amb MFC podria substituir un HFCW sense MFC seria convenient provar a escala pilot l'ús d'aquesta tecnologia.

7. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Afonin, A.N., Greene, S., Dzyubenko, N.I., & Frolov A.N. (eds.). 2008. Interactive Agricultural Ecological Atlas of Russia and Neighboring Countries. Economic Plants and their Diseases, Pests and Weeds[Online]. Disponible a: <http://www.agroatlas.ru>.
- Bombas Hasa (2015). Catálogo general 2015-2016[Online]. Disponible a: <http://www.bombashasa.com/imag/cat-tarifa/catalogo.pdf>
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science and Technology*, 40(7), 2426–2432. <http://doi.org/10.1021/es051652w>
- Corbella, C., & Puigagut, J. (2014). Effect of primary treatment and organic loading on methane emissions from horizontal subsurface flow constructed wetlands treating urban wastewater. *Ecological Engineering*, 80, 79–84. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.071>
- Corbella, C., Guivernau, M., Viñas, M., & Puigagut, J. (2015). Operational, design and microbial aspects related to power production with microbial fuel cells implemented in constructed wetlands. *Water Research*, 84, 232–242. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.005>
- Corbella, C., & Puigagut, J. (2015). Microbial fuel cells implemented in constructed wetlands: Fundamentals, current research and future perspectives The fundamentals: Microbial fuel cells technology, 134, 127–134. <http://doi.org/10.2436/20.7010.01.220>
- Corbella, C. & Puigagut, J. Improving domestic wastewater treatment efficiency with membrane-less microbial fuel cells: influence of anode material, external resistance and contact time. Under preparation.
- Cullell, A.M. (2015). Comparing conventional and natural wastewater treatment with life cycle assessment methodology. A case study in Nagpur, India. Tesina d'especialitat. *ETSECCPB: UPC*.
- Danés, C., Ruza, J., Bordas, M.A., Espinosa, G., & Puig, A. (2007). Manual para la gestión de vertidos: Autorización de vertido. *Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente*[Online]. Disponible a: http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/Manual_para_la_gestion_de_vertidos_tcm7-28966.pdf
- Dixon, A., Simon, M., & Burkitt, T. (2003). Assessing the environmental impact of two options for small-scale wastewater treatment: Comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. *Ecological Engineering*, 20(4), 297–308. [http://doi.org/10.1016/S0925-8574\(03\)00007-7](http://doi.org/10.1016/S0925-8574(03)00007-7)
- Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., Hu, Y., Hao, X., Xu, L., & Liu, R. (2015). A review of a recently emerged technology: Constructed wetland - Microbial fuel cells. *Water Research*, 85, 38–45. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.016>
- Flores, L. (2015). Life Cycle Assessment of a constructed wetland system for wastewater treatment and reuse in Nagpur, India. Treball Final de Grau. *ETSECCPB: UPC*.

- Fuchs, V. J., Mihelcic, J. R., & Gierke, J. S. (2011). Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions. *Water Research*, 45(5), 2073–2081. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.021>
- García, J., Morató, J., & Bayona, J.M. (2003). Depuración con sistemas naturales: humedales construidos (Material docent).
- García, J., & Corzo, A. (2008). Depuración con Humedales Construidos: Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. *Universidad Politécnica de Cataluña*[Online]. Disponible a: http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ge, Z., Li, J., Xiao, L., Tong, Y., & He, Z. (2013). Recovery of electrical energy in microbial fuel cells: brief review. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(2), 137–141.
- Jadhav, G. S., & Ghangrekar, M. M. (2009). Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration. *Bioresource Technology*, 100(2), 717–723. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.041>
- Juang, D. F., Yang, P. C., Chou, H. Y., & Chiu, L. J. (2011). Effects of microbial species, organic loading and substrate degradation rate on the power generation capability of microbial fuel cells. *Biotechnology Letters*, 33(11), 2147–2160. <http://doi.org/10.1007/s10529-011-0690-9>
- Kakarla, R., Kim, J. R., Jeon, B. H., & Min, B. (2015). Enhanced performance of an air-cathode microbial fuel cell with oxygen supply from an externally connected algal bioreactor. *Bioresource Technology*, 195, 210–216. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.062>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science and Technology*, 40(17), 5181–5192. <http://doi.org/10.1021/es0605016>
- Logan, B. E. & Rabaey, K. (2012). Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. *Science*, 337, 686–690.
- Machado, A. P., Urbano, L., Brito, A., Janknecht, P., Rodríguez, J. J., & Nogueira, R. (2006). Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities: energy-saving systems versus activated sludge. *Methodology*, (September 2016), 15–22. <http://doi.org/10.2166/wst.2007.497>
- Mander, Ü., Löhmus, K., Teiter, S., Mairing, T., Nurk, K., & Augustin, J. (2008). Gaseous fluxes in the nitrogen and carbon budgets of subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 404(2–3), 343–353. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.014>
- Pandey, P., Shinde, V. N., Deopurkar, R. L., Kale, S. P., Patil, S. A., & Pant, D. (2016). Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Applied Energy*, 168(August), 706–723. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.056>
- Rabaey, K., Rodríguez, J., Blackall, L. L., Keller, J., Gross, P., Batstone, D., ... & Nealson, K. H. (2007). Microbial ecology meets electrochemistry: electricity-driven and driving communities. *The ISME Journal*, 1(1), 9–18. <http://doi.org/10.1038/ismej.2007.4>

- Reap, J., Roman, F., Duncan, S., & Bras, B. (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 2: Impact assessment and interpretation. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(5), 374–388. <http://doi.org/10.1007/s11367-008-0009-9>
- Rizzo, A., Boano, F., Revelli, R., & Ridolfi, L. (2013). Can microbial fuel cells be an effective mitigation strategy for methane emissions from paddy fields? *Ecological Engineering*, 60, 167–171. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.033>
- Torras, C. (2014). Determinació del material d'elèctrode òptim per a la maximització de la producció elèctrica de piles microbianes implementades en aiguamolls construïts. Tesina d'especialitat. *ETSECCPB: UPC*.
- Vilarrubias, S. (2014). Depuració d'aigües residuals. Paper bioindicador dels protozous i els bacteris filamentosos. Treball Final de Grau. *Facultat de Biociències: UAB*.
- Yildirim, M., & Topkaya, B. (2012). Assessing Environmental Impacts of Wastewater Treatment Alternatives for Small-Scale Communities. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 40(2), 171–178. <http://doi.org/10.1002/clen.201000423>
- Zhang, X., Shi, J., Liang, P., Wei, J., Huang, X., Zhang, C., & Logan, B. E. (2013). Power generation by packed-bed air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 142, 109–114. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.014>
- Zhou, M., Chi, M., Luo, J., He, H., & Jin, T. (2011). An overview of electrode materials in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(10), 4427–4435. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.012>